



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

LUCAS DALLA MARIA

**Estudo Experimental das Ondas de Fração de
Vazio e Pressão em Escoamento Horizontal
Transiente de Ar e Água no Padrão Intermitente**

CAMPINAS

2016

LUCAS DALLA MARIA

Estudo Experimental das Ondas de Fração de Vazio e Pressão em Escoamento Horizontal Transiente de Ar e Água no Padrão Intermitente

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO LUCAS DALLA MARIA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. EUGÊNIO SPANÓ ROSA.


.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FUNCAMP, 4271/2012

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

D16e Dalla Maria, Lucas, 1990-
Estudo experimental das ondas de fração de vazio e pressão em escoamento horizontal transiente de ar e água no padrão intermitente / Lucas Dalla Maria. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Eugênio Spanó Rosa.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Escoamento intermitente. 2. Ondas. 3. Fração de vazio. I. Rosa, Eugênio Spanó, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Experimental study of the void fraction and pressure waves in a transient horizontal air-water flow on the slug regime

Palavras-chave em inglês:

Intermittent flow

Waves

Void fraction

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Eugênio Spanó Rosa [Orientador]

Marcelo Souza de Castro

Gherhardt Ribatski

Data de defesa: 23-02-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

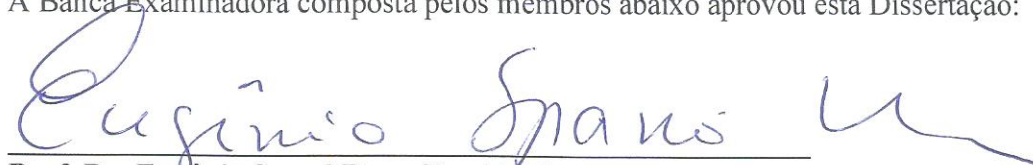
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Estudo Experimental das Ondas de Fração de
Vazio e Pressão em Escoamento Horizontal
Transiente de Ar e Água no Padrão Intermitente**

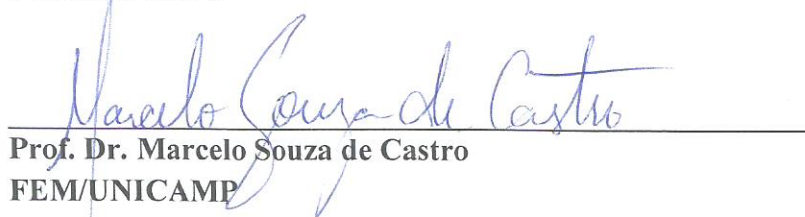
Autor: Lucas Dalla Maria

Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa

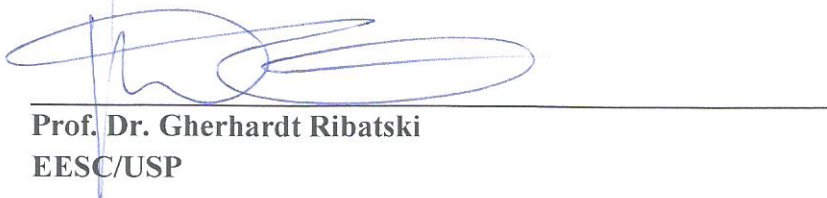
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa, Presidente
FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Marcelo Souza de Castro
FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Gherhardt Ribatski
EESC/USP**

Campinas, 23 de fevereiro de 2016.

Aos meus pais, Jorge e Mari Elia.
Aos meus irmãos, Daniel e Priscila.
À minha namorada, Carolina.

Agradecimentos

Aos meus pais, Jorge e Mari Elia, pela inspiração e pela dedicação.

Aos meus irmãos, Daniel e Priscila, pelo carinho e pela confiança.

À minha namorada, Carolina, pelo amor e pelo companheirismo.

A toda minha família, em especial aos meus avós paternos Ernesto Antonio (*in memoriam*) e Adele, e aos meus avós maternos José Stefano (*in memoriam*) e Therezinha Ignez (*in memoriam*), pelo apoio e pelo incentivo.

A todos os meus amigos, em especial, ao Maikon e à Michele, pela convivência e pelo apoio.

Ao meu orientador, professor Eugênio Spanó Rosa, pela amizade e pela oportunidade de crescimento e desenvolvimento.

Ao grupo de pesquisa *Two-Phase Flow Group*, em especial ao professor Ricardo Augusto Mazza, Christiano Santim, Jonathan Sant'Anna, Jéssica Gonçalves e Nathan Maidana, pelas discussões e pelo aprendizado.

Ao corpo técnico do Laboratório de Escoamentos Bifásicos, em especial ao Alcimar, Adriano e Lucas, pelo suporte.

A todos os amigos e colegas da Universidade Estadual de Campinas, pelo convívio e pela amizade.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, pelos ensinamentos.

À Universidade Estadual de Campinas, pelo apoio institucional.

Aos professores da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, em especial ao professor Luís Edson Saraiva e ao professor Charles Leonardo Israel, pelos ensinamentos.

À Universidade de Passo Fundo, pela formação de engenheiro mecânico.

Ao Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, pelos dados meteorológicos.

À Petrobras e à Fundação de Desenvolvimento da Universidade Estadual de Campinas, pelo apoio financeiro através do contrato 4271/2012.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação e para a realização deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

Resumo

As ondas de fração de vazio e de pressão em escoamento horizontal transiente de ar e água no padrão intermitente são investigadas experimentalmente. A seção de teste é composta por uma tubulação horizontal transparente de acrílico com 26 mm de diâmetro interno e 26,24 m de comprimento operando à pressão atmosférica. Os escoamentos transientes são induzidos através de variações bruscas da vazão volumétrica da fase líquida ou gasosa. A matriz de teste consiste em quatro condições operacionais com mudanças simétricas das velocidades superficiais de ar e água, o que possibilita o estudo das ondas de expansão e compressão no padrão golfadas. Repete-se cada teste experimental 100 vezes. Emprega-se o processo de média de conjunto para filtrar o comportamento intermitente intrínseco do padrão golfadas e revelar as características das ondas de fração de vazio e de pressão. Registram-se também os parâmetros geométricos e cinemáticos, tais como: a velocidade de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento da bolha alongada, o comprimento do pistão de líquido, o fator de intermitência, a frequência de passagem de golfadas e a taxa média de coalescência. Estimam-se as velocidades experimentais das ondas de fração de vazio e de pressão para os quatro testes experimentais. Comparam-se as velocidades experimentais com os modelos e correlações de predição disponíveis. O objetivo do trabalho é duplo: caracterizar as ondas de fração de vazio e de pressão e descrever os mecanismos do escoamento transiente no padrão golfadas através das alterações das propriedades discretas do escoamento intermitente.

Palavras-chave: onda de pressão, onda de fração de vazio, transiente, escoamento intermitente.

Abstract

The void fraction and the pressure waves in a transient air and water horizontal slug flow are experimentally investigated. The test section is made of a transparent acrylic pipe with 26 mm ID and 26.24 m long operating at atmospheric pressure. The transient flows are induced by quickly changing the gas or the liquid inlet volumetric flow rate. The test grid has four operational conditions with symmetric air and water superficial velocities changes, which allows the study of the expansion and compression waves in slug flow. Each experimental run is repeated 100 times. An ensemble average procedure is employed to filter out the intermittent intrinsic behavior of slug flow and to disclose the void fraction and pressure waves' features. The slug flow properties are also recorded, such as: the bubble nose translational velocity, the long bubble length, the liquid slug length, the intermittence factor, the slug frequency of passage and the average coalescence rate. The experimental void fraction and pressure velocities are estimated for the four experimental tests. The experimental velocities are compared with the available predicting models and correlations. The objective of the work is two-fold: to characterize the void fraction and pressure waves and to disclose the mechanics of the transient slug flow through the changes of the discrete slug flow properties.

Keywords: pressure wave, void fraction wave, transient, slug flow.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1. Padrões de escoamento horizontais gás-líquido. Fonte: Adaptada de Shoham, 2006.....	28
Figura 1.2. Representação esquemática da célula unitária.	30
Figura 3.1. Fotografia aérea do Laboratório de Escoamento Bifásico do <i>Two-Phase Flow Group</i> . Fonte: Google Maps®	44
Figura 3.2. Representação esquemática do aparato experimental.	45
Figura 3.3. (a) Reservatório de ar comprimido; (b) válvula agulha e válvula esfera de fechamento rápido; (c) válvula agulha controlada por motor de passo e (d) motor de passo..	47
Figura 3.4. Injetor de correntes paralelas.	47
Figura 3.5. (a) Tubulação horizontal da seção de teste; (b) união; (c) união flangeada e (d) suporte telescópico.....	48
Figura 3.6. Estação de medição com dois sensores de condutância e um transdutor de pressão.....	49
Figura 3.7. (a) Representação esquemática do sensor de condutância e (b) representação do circuito equivalente.	50
Figura 3.8. Representação esquemática do módulo de monitoramento dos fluidos de teste. .	53
Figura 3.9. Interface gráfica do programa computacional Supervisorio.....	54
Figura 3.10. Representação esquemática do módulo de aquisição de dados.	55
Figura 3.11. Interface gráfica do programa computacional Adquire.....	56
Figura 3.12. Definição dos períodos inicial, transiente e final.	58
Figura 4.1. Processo de média de conjunto da fração de vazio correspondente à estação de medição 2 do teste #1. (a) Sinal de $(1-V^*)$ para 1 aquisição; (b) sinal médio de $(1-V^*)$ para 10	

aquisições; (c) sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições; (d) sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições após média móvel de 3001 pontos e (e) sinal médio de 100 aquisições após média móvel centrada de 3001 pontos e conversão em fração de vazio. 61

Figura 4.2. Processo de média de conjunto da pressão correspondente à estação de medição 2 do teste #1. (a) Sinal de pressão para 1 aquisição; (b) sinal médio de pressão para 10 aquisições; (c) sinal médio de pressão para 100 aquisições e (d) sinal médio de pressão para 100 aquisições após média móvel centrada de 31 pontos. 62

Figura 4.3. Processo de média de conjunto da fração de vazio correspondente à estação de medição 2 do teste #4. (a) Sinal de $(1-V^*)$ para 1 aquisição, (b) sinal médio de $(1-V^*)$ para 10 aquisições; (c) sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições; (d) sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições após média móvel de 3001 pontos e (e) sinal médio de 100 aquisições após média móvel centrada de 3001 pontos e conversão em fração de vazio. 63

Figura 4.4. Processo de média de conjunto da pressão correspondente à estação de medição 2 do teste #4. (a) Sinal de pressão para 1 aquisição; (b) sinal médio de pressão para 10 aquisições; (c) sinal médio de pressão para 100 aquisições e (d) sinal médio de pressão para 100 aquisições após média móvel centrada de 31 pontos. 64

Figura 4.5. Representação esquemática do critério de determinação do instante inicial para (a) a onda de fração de vazio e (b) a onda de pressão referentes à estação de medição 3 do teste #1. 65

Figura 4.6. Representação esquemática do critério de determinação do instante inicial para (a) a onda de fração de vazio e (b) a onda de pressão referentes à estação de medição 3 do teste #3. 66

Figura 4.7. Interface gráfica do programa computacional Slug. 70

Figura 4.8. Dependência funcional entre o fator de corte e o número de ocorrência de bolhas da estação de medição 1 para o teste #2..... 71

Figura 4.9. Sinais de tensão normalizada e ondas quadradas dos sensores de condutância da estação de medição 1 para o teste #2..... 72

Figura 4.10. Sinais lógicos de dois sensores de condutância de determinada estação de medição. Fonte: Duarte, 2007.....	74
Figura 4.11. Propriedades cinemáticas e geométricas do escoamento intermitente das 100 aquisições da estação de medição 3 do teste #2. (a) Velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) comprimento adimensional da bolha alongada; (c) comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) fator de intermitência e (e) frequência de passagem de golfadas.	77
Figura 4.12. Propriedades cinemáticas e geométricas do escoamento intermitente das 100 aquisições da estação de medição 3 do teste #3. (a) Velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) comprimento adimensional da bolha alongada; (c) comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) fator de intermitência e (e) frequência de passagem de golfadas.	79
Figura 5.1. Mapa de fluxo horizontal de Taitel e Dukler (1976) para escoamento bifásico de ar e água com as velocidades superficiais médias de gás e líquido para os quatro testes experimentais.	86
Figura 5.2. Nariz, corpo e cauda da bolha alongada referentes aos estados inicial e final para os quatro testes experimentais.	88
Figura 5.3. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #1.	92
Figura 5.4. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #2.	93
Figura 5.5. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #3.	95
Figura 5.6. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #4.	97

Figura 5.7. Gradientes médios de pressão para os quatro testes experimentais.	98
Figura 5.8. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #1.	106
Figura 5.9. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #2.	107
Figura 5.10. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #3.	110
Figura 5.11. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #4.	111
Figura 5.12. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #1.	113
Figura 5.13. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #2.	115
Figura 5.14. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #3.	117
Figura 5.15. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #4.	119

Figura 5.16. Velocidades experimentais da onda de fração de vazio em comparação com **(a)** as velocidades experimentais de translação do nariz da bolha alongada e **(b)** as velocidades de translação do nariz da bolha alongada estimadas pela correlação cinemática de Bendiksen (1984) para os quatro testes experimentais. 131

Figura 5.17. Velocidades experimentais da onda de pressão em comparação com **(a)** o modelo de Matsui *et al.* (1979), **(b)** o modelo de Martin e Padmanabhan (1979) e **(c)** o modelo de Gavage (1991) para os quatro testes experimentais..... 135

Figura A.1. Funções densidade de probabilidade da fração de vazio média dos estados inicial e final para as quatro estações de medição do teste #1. 142

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Velocidades superficiais nominais das fases líquida e gasosa dos estados inicial e final para os quatro testes experimentais.....	59
Tabela 4.1. Sensibilidade da velocidade da onda de fração de vazio (c_α) para médias móveis centradas com diferentes números de pontos e processo de média de conjunto com 100 aquisições.	67
Tabela 4.2. Sensibilidade da velocidade da onda de pressão (c_p) para médias móveis centradas com diferentes números de pontos e processo de média de conjunto com 100 aquisições.	67
Tabela 4.3. Sensibilidade da velocidade da onda de fração de vazio (c_α) para média móvel centrada de 3001 pontos e diferentes tamanhos de amostragem.	68
Tabela 4.4. Sensibilidade da velocidade da onda de pressão (c_p) para média móvel centrada de 31 pontos e diferentes tamanhos de amostragem.	69
Tabela 4.5. Incertezas das propriedades médias contínuas, das velocidades das ondas e dos parâmetros médios discretos para os quatro testes experimentais.	80
Tabela 5.1. Velocidades superficiais médias de gás e líquido no injetor de correntes paralelas, nas quatro estações de medição e na saída da seção de teste nos estados inicial e final para os quatro testes experimentais.	85
Tabela 5.2. Frações de vazio médias e pressões médias nas quatro estações de medição para os quatro testes experimentais.	90
Tabela 5.3. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #1.	100
Tabela 5.4. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #2.	101

Tabela 5.5. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #3.	102
Tabela 5.6. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #4.	103
Tabela 5.7. Velocidades experimentais de propagação da onda de fração de vazio e da onda de pressão para os quatro testes experimentais.....	125
Tabela 5.8. Erros relativos e erros relativos médios entre as velocidades experimentais da onda de fração de vazio e os modelos de predição da velocidade da onda de fração de vazio para os quatro testes experimentais.....	130
Tabela 5.9. Erros relativos e erros relativos médios entre as velocidades experimentais da onda de pressão e os modelos de predição da velocidade da onda de pressão para os quatro testes experimentais.	133
Tabela A.1. Velocidades da onda de fração de vazio (c_α) e da onda de pressão (c_p) para análise de incertezas.	143

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

A	Área transversal da seção de teste	[m ²]
c _p	Velocidade de propagação da onda de pressão de uma perturbação não infinitesimal	[m/s]
c _{p,G}	Velocidade de propagação da onda de pressão no <i>plug</i> gasoso	[m/s]
c _{p,L}	Velocidade de propagação da onda de pressão no <i>plug</i> líquido	[m/s]
c _α	Velocidade de propagação da onda de fração de vazio de uma perturbação não infinitesimal	[m/s]
cpb	Conjunto pistão - bolha	[-]
\bar{C}	Taxa média de coalescência	[%/m]
C ₀	Parâmetro de distribuição	[-]
C _G	Capacitância elétrica da fase gasosa	[F]
C _L	Capacitância elétrica da fase líquida	[F]
C _{VM}	Coefficiente de massa virtual	[-]
D	Diâmetro interno da seção de teste	[mm]
E1	Estação de medição 1	[-]
E2	Estação de medição 2	[-]
E3	Estação de medição 3	[-]
E4	Estação de medição 4	[-]
f	Frequência de passagem de golfadas	[1/s]
\bar{f}	Frequência média de passagem de golfadas	[1/s]
f _{aq}	Frequência de aquisição de dados	[1/s]
f _j	Frequência de passagem da j-ésima unidade	[1/s]
\bar{f}_q	Frequência média de passagem de golfadas na q-ésima estação de medição	[1/s]
FC	Fator de corte	[-]
Fr	Número de Froude	[-]
g	Aceleração gravitacional	[m/s ²]
h _f	Espessura média na seção do filme de líquido	[mm]

ID	Diâmetro interno ou <i>Internal diameter</i>	[mm]
J	Velocidade superficial de mistura	[m/s]
J_G	Velocidade superficial da fase gasosa ou Fluxo volumétrico da fase gasosa	[m/s]
\bar{J}_G	Velocidade superficial média da fase gasosa ou Fluxo volumétrico médio da fase gasosa	[m/s]
J_G^n	Velocidade superficial nominal da fase gasosa	[m/s]
J_L	Velocidade superficial da fase líquida ou Fluxo volumétrico da fase líquida	[m/s]
\bar{J}_L	Velocidade superficial média da fase líquida ou Fluxo volumétrico médio da fase líquida	[m/s]
J_L^n	Velocidade superficial nominal da fase líquida	[m/s]
k	Coeficiente politrópico	[-]
L_B	Comprimento da bolha alongada	[mm]
L_{Bj}	Comprimento da j-ésima bolha alongada	[mm]
L_B/D	Comprimento adimensional da bolha alongada	[-]
\bar{L}_B/D	Comprimento adimensional médio da bolha alongada	[-]
L_S	Comprimento do pistão de líquido	[mm]
L_{Sj}	Comprimento do j-ésimo pistão de líquido	[mm]
L_S/D	Comprimento adimensional do pistão de líquido	[-]
\bar{L}_S/D	Comprimento adimensional médio do pistão de líquido	[-]
L_u	Comprimento da unidade	[mm]
L_{uj}	Comprimento da j-ésima unidade	[mm]
N	Número de amostras	[-]
P	Pressão absoluta	[kPa]
\bar{P}	Pressão absoluta média	[kPa]
Q_G	Vazão volumétrica da fase gasosa	[m ³ /s]
Q_L	Vazão volumétrica da fase líquida	[m ³ /s]
R_f	Fração de líquido média na seção do filme de líquido	[-]
R_s	Fração de líquido do pistão de líquido	[-]
R_u	Fração de líquido da unidade	[-]
R_L	Resistência elétrica da fase líquida	[Ω]
Re	Número de Reynolds baseado na velocidade superficial de mistura	[-]
S	Espaçamento entre dois sensores de condutância	[mm]

$tb_{i,j}$	Tempo de residência da bolha alongada da unidade j em contato o sensor i	[s]
t_B	Período da bolha alongada ou Tempo de residência da bolha alongada	[s]
$ts_{i,j}$	Tempo de residência do pistão de líquido da unidade j em contato com o sensor i	[s]
t_s	Período do pistão de líquido ou Tempo de residência do pistão de líquido	[s]
t_u	Período da unidade ou Tempo de residência da unidade	[s]
$tu_{i,j}$	Tempo de residência da unidade j no sensor i	[s]
t_v	Coefficiente <i>t-Student</i>	[-]
$TB_{i,j}$	Intervalo de tempo entre o início da aquisição e a bolha alongada da unidade j no sensor i	[s]
$TS_{i,j}$	Intervalo de tempo entre o início da aquisição e o pistão de líquido da unidade j no sensor i	[s]
u_{bd}	Velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido	[m/s]
u_f	Velocidade média na seção do filme de líquido	[m/s]
u_G	Velocidade <i>in situ</i> da fase gasosa	[m/s]
$u_{G,J}$	Velocidade de deslizamento	[m/s]
u_L	Velocidade <i>in situ</i> da fase líquida	[m/s]
u_{LS}	Velocidade do líquido no pistão de líquido	[m/s]
u_T	Velocidade de translação do nariz da bolha alongada	[m/s]
\bar{u}_T	Velocidade média de translação do nariz da bolha alongada	[m/s]
u_{Tj}	Velocidade de translação do nariz da j-ésima bolha alongada	[m/s]
V	Voltagem instantânea do sensor	[V]
V^*	Voltagem adimensional normalizada	[-]
$V_{mín}$	Voltagem referente à fase gasosa	[V]
$V_{máx}$	Voltagem referente à fase líquida	[V]
z	Coordenada axial da seção de teste	[m]
z_f	Coordenada axial da seção de teste no filme de líquido	[m]

Letras Gregas

α	Fração de vazio da unidade	[-]
$\bar{\alpha}$	Fração de vazio média da unidade	[-]

α_f	Fração de vazio média na seção do filme de líquido	[-]
α_s	Fração de vazio do pistão de líquido	[-]
α_u	Fração de vazio da unidade	[-]
β	Fator de intermitência	[-]
$\bar{\beta}$	Fator médio de intermitência	[-]
β_j	Fator de intermitência da j-ésima unidade	[-]
$\delta\bar{P}$	Incerteza absoluta da pressão absoluta média	[kPa]
δS	Incerteza absoluta do espaçamento entre dois sensores de condutância	[mm]
$\delta\bar{\alpha}$	Incerteza absoluta da fração de vazio média	[-]
$\delta\Delta t$	Incerteza absoluta do intervalo de tempo necessário para o nariz da bolha alongada percorrer a distância entre dois sensores de condutância	[s]
ΔL	Distância entre duas estações de medição consecutivas	[m]
ΔTB_j	Intervalo de tempo necessário pelo nariz da j-ésima bolha alongada no deslocamento entre dois sensores	[s]
εc_α	Incerteza relativa da velocidade de propagação da onda de fração de vazio	[m/s]
εc_p	Incerteza relativa da velocidade de propagação da onda de pressão	[m/s]
$\varepsilon\bar{C}$	Incerteza relativa da taxa média de coalescência	[%/m]
$\varepsilon\bar{f}$	Incerteza relativa da frequência média de passagem de golfadas	[1/s]
$\varepsilon FC_{\bar{f}}$	Incerteza relativa da frequência média de passagem de golfadas atribuída ao fator de corte	[1/s]
$\varepsilon FC_{\bar{L}_B/D}$	Incerteza relativa do comprimento adimensional médio da bolha alongada atribuída ao fator de corte	[mm]
$\varepsilon FC_{\bar{L}_S/D}$	Incerteza relativa do comprimento adimensional médio do pistão de líquido atribuída ao fator de corte	[mm]
$\varepsilon FC_{\bar{u}_r}$	Incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada atribuída ao fator de corte	[m/s]
$\varepsilon FC_{\bar{\beta}}$	Incerteza relativa do fator médio de intermitência atribuída ao fator de corte	[-]
$\varepsilon\bar{J}_G$	Incerteza relativa da velocidade superficial média da fase gasosa	[m/s]
$\varepsilon\bar{J}_L$	Incerteza relativa da velocidade superficial média da fase líquida	[m/s]
$\varepsilon\bar{L}_B/D$	Incerteza relativa do comprimento adimensional médio da bolha alongada	[-]

$\varepsilon \bar{L}_s/D$	Incerteza relativa do comprimento adimensional médio do pistão de líquido	[-]
εt_B	Incerteza relativa do tempo de residência da bolha alongada	[s]
εt_s	Incerteza relativa do tempo de residência do pistão de líquido	[s]
εt_u	Incerteza relativa do tempo de residência da unidade	[s]
$\varepsilon \bar{u}_T$	Incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada	[m/s]
$\varepsilon \bar{\alpha}$	Incerteza relativa da fração de vazio média da unidade	[-]
$\varepsilon \bar{\beta}$	Incerteza relativa do fator médio de intermitência	[-]
λ	Autovalores do modelo <i>drift-flux</i>	[m/s]
ν	Viscosidade cinemática da água	[m ² /s]
ρ_G	Massa específica da fase gasosa	[kg/m ³]
ρ_L	Massa específica da fase líquida	[kg/m ³]
σ	Desvio padrão	[-]; [m/s]

Sobrescritos

n	Nominal
ΔJ_G	Variação infinitesimal da velocidade superficial da fase gasosa
ΔJ_L	Variação infinitesimal da velocidade superficial da fase líquida
*	Adimensional

Subscritos

b, B	Bolha Alongada
f	Filme de líquido
G	Fase gasosa
i	Posição do sensor de condutância
j	Número da unidade
k	Fase
L	Fase líquida
m	Número total de unidades
P	Pressão

q	Estação de medição
s, S	Pistão de líquido
T	Translação do nariz da bolha alongada
u	Unidade
α	Fração de vazio

Siglas

2PFG	<i>Two-Phase Flow Group</i>
Cepagri	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura
DE	Departamento de Energia
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
RMS	<i>Root mean square</i> ou Raiz do valor quadrático médio
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USP	Universidade de São Paulo

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	26
1.1	Nomenclatura Básica	29
1.2	Estrutura da Dissertação.....	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	Onda de Fração de Vazio em Escoamento Bifásico no Padrão Intermitente.....	35
2.2	Onda de Pressão em Escoamento Bifásico no Padrão Intermitente	37
2.3	Ondas de Fração de Vazio e de Pressão em Escoamento Bifásico Transiente no Padrão Intermitente	41
3	APARATO EXPERIMENTAL	44
3.1	Descrição do Aparato Experimental	44
3.2	Instrumentação	50
3.2.1	Sensor de Condutância	50
3.2.2	Transdutor de Pressão	51
3.2.3	Transmissor de Temperatura	51
3.3	Sistema de Gerenciamento	51
3.3.1	Módulo de Monitoramento dos Fluidos de Teste	52
3.3.2	Módulo de Aquisição de Dados.....	54
3.4	Procedimento Experimental	56
4	PROCESSAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DE INCERTEZAS	60
4.1	Determinação da Velocidade da Onda de Fração de Vazio e da Onda de Pressão	60

4.2	Determinação dos Parâmetros Geométricos e Cinemáticos.....	69
4.3	Análise de Incertezas	80
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE	83
5.1	Condições Operacionais.....	83
5.2	Análise das Imagens	86
5.3	Propriedades Contínuas: Fração de Vazio e Pressão	89
5.3.1	Fração de Vazio e Pressão Médias na Seção de Teste	89
5.3.2	Evolução Temporal das Velocidades Superficiais, da Fração de Vazio e da Pressão.....	90
5.3.3	Gradientes Médios de Pressão na Seção de Teste	97
5.4	Propriedades Discretas: Parâmetros Geométricos e Cinemáticos	99
5.4.1	Parâmetros Geométricos e Cinemáticos Médios na Seção de Teste.....	99
5.4.2	Funções Densidade de Probabilidade dos Parâmetros Geométricos e Cinemáticos.....	104
5.4.3	Evolução Temporal dos Parâmetros Geométricos e Cinemáticos.....	112
5.5	Análise Mecanicista	120
5.6	Onda de Fração de Vazio e Onda de Pressão: Velocidades Experimentais.....	123
5.7	Onda de Fração de Vazio e Onda de Pressão: Modelos e Correlações.....	127
6	CONCLUSÕES.....	136
	REFERÊNCIAS.....	138
	APÊNDICE A - ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	141
A.1	Análise de Incertezas da Fração de Vazio Média e da Pressão Média.....	141
A.2	Análise de Incertezas das Velocidades da Onda de Fração de Vazio e da Onda de Pressão.....	142

A.3	Análise de Incertezas dos Parâmetros Médios Geométricos e Cinemáticos.....	143
A.3.1	Incerteza da Velocidade Média de Translação do Nariz da Bolha Alongada.....	144
A.3.2	Incerteza do Comprimento Adimensional Médio da Bolha Alongada....	146
A.3.3	Incerteza do Comprimento Adimensional Médio do Pistão de Líquido..	147
A.3.4	Incerteza do Fator Médio de Intermitência	148
A.3.5	Incerteza da Frequência Média de Passagem de Golfadas.....	148
A.3.6	Incerteza da Taxa Média de Coalescência.....	149

1 INTRODUÇÃO

O escoamento simultâneo de duas ou mais fases imiscíveis com propriedades físicas diferentes é denominado escoamento multifásico. Adicionalmente, o termo fase representa uma quantidade de matéria homogênea líquida, sólida ou gasosa com fronteiras definidas por interfaces.

Escoamentos multifásicos são encontrados em numerosos processos naturais e industriais. Na natureza, destacam-se as tempestades de areia, neblina, transporte de sedimentos em rios, lava vulcânica, bem como o escoamento sanguíneo no interior de veias e artérias. No âmbito industrial, salientam-se os processos de combustão e gaseificação, transporte de materiais particulados e emulsões, leitos fluidizados, torres de destilação, torres de resfriamento, condensadores, sistema de refrigeração de reatores nucleares e produção de óleo e gás em campos petrolíferos.

A distribuição espacial das fases nos escoamentos multifásicos podem apresentar configurações variadas em função das condições operacionais, das características geométricas da tubulação e das propriedades físicas dos fluidos, originando diferentes padrões de escoamento. Um caso específico dos escoamentos multifásicos é o escoamento simultâneo de gás e líquido em tubulações horizontais.

A Figura 1.1 apresenta os padrões de escoamento para escoamentos bifásicos gás-líquido em dutos horizontais, em concordância com Shoham (2006). O regime de fases dispersas refere-se ao padrão bolhas dispersas. O regime de fases separadas contempla o padrão estratificado liso, estratificado ondulado, semianular e anular. O regime intermitente é considerado como uma combinação dos regimes de fases dispersas e separadas, uma vez que compreende um pistão de líquido, representando o regime de fases dispersas, seguido por uma bolha alongada, correspondendo ao regime de fases separadas.

O padrão de escoamento estratificado ocorre com velocidades superficiais de líquido e gás relativamente baixas. Caracteriza-se pela segregação gravitacional dos fluidos de teste, dado que a fase com maior massa específica escoar na região inferior da tubulação e a fase com menor massa específica percorre o duto pela região superior. Denomina-se estratificado liso, se a interface gás-líquido for aproximadamente plana, e estratificado ondulado, se a interface gás-líquido apresentar ondas estáveis.

As perturbações interfaciais do escoamento estratificado ondulado crescem até atingirem toda a seção transversal da tubulação e enclausurarem pequenas porções de gás, ocasionando o padrão bolhas dispersas. No padrão bolhas dispersas, observam-se pequenas bolhas distribuídas na fase contínua líquida. O padrão bolhas dispersas pode ser subdividido em bolhas distorcidas e bolhas uniformes.

A coalescência das bolhas dispersas promove o crescimento das estruturas gasosas e, conseqüentemente, o surgimento do regime intermitente. O regime intermitente é definido pela alternância entre as fases líquida e gasosa. A fase líquida é disposta em pistões de líquido ocupando toda a seção transversal da tubulação e em filmes de líquido escoando na região inferior das regiões gasosas, enquanto a fase gasosa é transportada em bolhas distribuídas na região superior do duto. Subdivide-se o regime intermitente em função da aeração do pistão de líquido. Se o pistão de líquido é não aerado, tem-se o escoamento no padrão bolhas alongadas. Com o aumento da velocidade superficial de gás, o pistão de líquido torna-se aerado por pequenas bolhas, sobretudo, na região imediatamente à jusante das bolhas alongadas, propiciando o surgimento do padrão golfadas. O padrão golfadas também é denominado por pistonado ou simplesmente intermitente. Na língua inglesa, usa-se o termo *slug flow*.

No presente trabalho, desconsidera-se a diferença de nomenclatura dos padrões de escoamento contidos no regime intermitente e assume-se como sinônimos os termos pistonado, intermitente, golfadas e *slug flow*. Salienta-se ainda a diferenciação entre os termos bolha alongada e bolha de Taylor. Em escoamento vertical, a região gasosa simétrica delimitada pelo filme de líquido descendente é denominada bolha de Taylor. Complementarmente, em escoamento horizontal, a região gasosa não simétrica limitada por um espesso filme de líquido é chamada de bolha alongada.

O padrão de escoamento semianular é definido pelo transporte desordenado das fases, sendo considerado um padrão de transição entre o pistonado e o anular. O padrão de escoamento anular é observado para elevadas velocidades superficiais de gás e caracteriza-se por um núcleo gasoso envolvido por um filme de líquido anular escoando próximo à parede da tubulação.

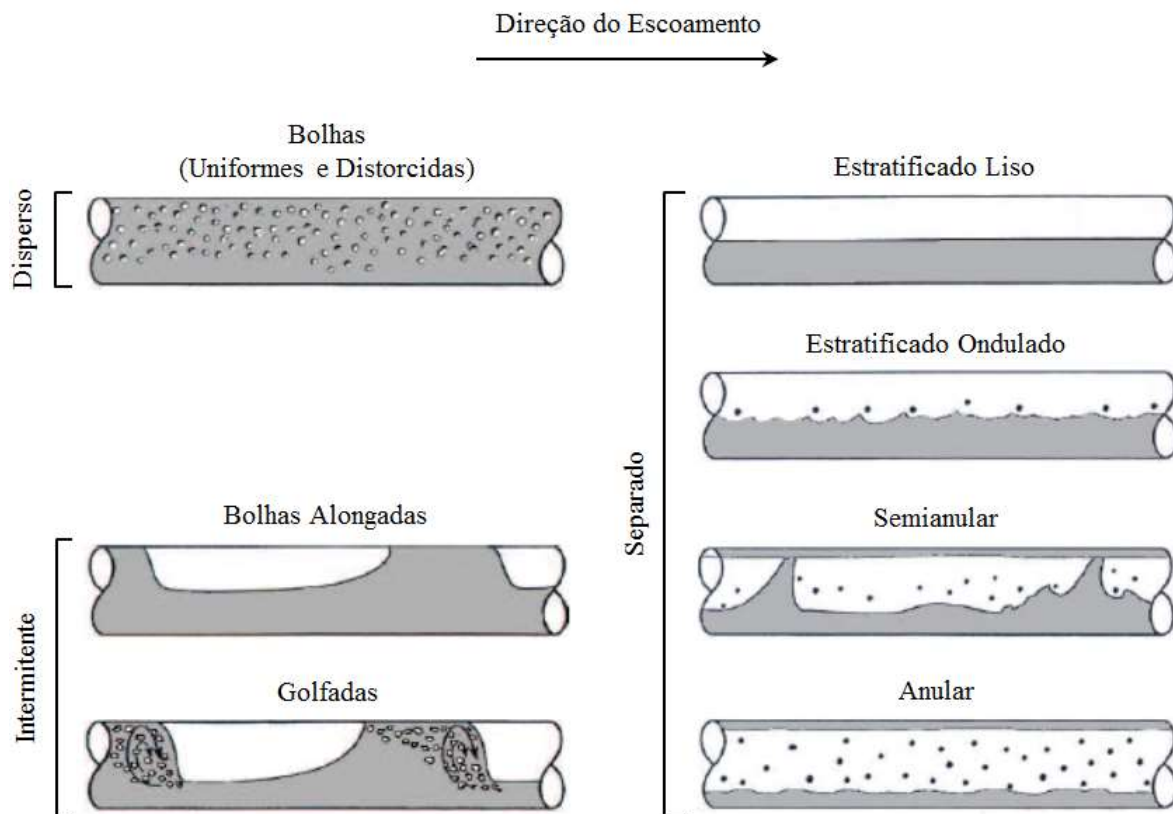


Figura 1.1. Padrões de escoamento horizontais gás-líquido. Fonte: Adaptada de Shoham, 2006.

As ondas de fração de vazio e de pressão em escoamentos transientes bifásicos são importantes, tanto nos aspectos teóricos quanto nas aplicações industriais. Os aspectos teóricos das ondas de fração de vazio e de pressão incluem, por exemplo: ondas de choque, ondas de densidade, instabilidades hidrodinâmicas e transição entre diferentes padrões de escoamento. Ademais, perturbações na pressão impreterivelmente causam flutuações na fração de vazio, visto que as ondas de fração de vazio e de pressão são acopladas através das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento. Adicionalmente, na área nuclear, as ondas de fração de vazio e de pressão em escoamentos transientes estão diretamente relacionadas à perda de fluido refrigerante em sistemas de refrigeração de reatores nucleares, ao escoamento crítico por ruptura da tubulação de fluido quente ou frio em reatores com água pressurizada e às instabilidades hidrodinâmicas em canais paralelos com ebulição. Na indústria petrolífera, os escoamentos transientes ocorrem em partida e parada de linha, em métodos de recuperação de óleo através da injeção alternada de água e gás, na elevação artificial de petróleo, em sistemas de garantia de escoamento e na produção de óleo e gás em *risers* verticais, onde o *slugging* severo comumente ocorre. Além disso, os dados experimentais em escoamento transiente de ar e água são empregados na validação de modelos computacionais para escoamento bifásico transiente.

O objetivo principal deste trabalho é o estudo fundamental do escoamento bifásico transiente no padrão intermitente. Os objetivos específicos estão listados a seguir:

- Visualização das características geométricas da bolha alongada e do pistão de líquido;
- Levantamento experimental dos valores médios de fração de vazio e de pressão;
- Caracterização do comportamento temporal da fração de vazio e da pressão;
- Determinação do gradiente médio de pressão na seção de teste;
- Levantamento experimental dos valores médios da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento da bolha alongada, do comprimento do pistão de líquido, do fator de intermitência, da frequência de passagem de golfadas e da taxa de coalescência;
- Determinação das funções densidade de probabilidade da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento da bolha alongada, do comprimento do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas;
- Desenvolvimento da análise mecanicista para relacionar as ondas de fração de vazio e de pressão com a evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento da bolha alongada e do comprimento do pistão de líquido;
- Determinação das velocidades experimentais das ondas de fração de vazio e de pressão;
- Comparação entre as velocidades experimentais das ondas de fração de vazio e de pressão e os modelos e correlações de predição.

1.1 Nomenclatura Básica

O escoamento horizontal bifásico no padrão intermitente é caracterizado pela sucessão de unidades compostas por uma bolha alongada e por um pistão de líquido. A característica mais marcante deste padrão é a intermitência temporal e espacial, visto que a bolha alongada e o pistão de líquido não ocorrem com periodicidade e dimensões definidas. Wallis (1969) propôs uma aproximação periódica para as estruturas líquida e gasosa através do conceito de célula unitária. Desse modo, modela-se o escoamento intermitente através das propriedades

individuais de uma unidade e assume-se que estas propriedades se repetem temporalmente e espacialmente.

A Figura 1.2 apresenta uma célula unitária e as propriedades comumente utilizadas na modelagem matemática do escoamento intermitente. O termo ‘médio na seção’ empregado nas variáveis refere-se às propriedades definidas na região da bolha alongada, onde a velocidade, fração volumétrica e espessura representam os valores médios na seção transversal do tubo podendo variar ao longo da coordenada z_f . O comprimento da bolha alongada, o comprimento do pistão de líquido e o comprimento da unidade são simbolizados, respectivamente, por L_B , L_S e L_u . A velocidade de translação do nariz da bolha alongada, a velocidade do líquido no pistão de líquido e a velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido são representadas por, respectivamente, u_T , u_{LS} e u_{bd} . A velocidade *in situ* da fase líquida, a velocidade *in situ* da fase gasosa e a velocidade média na seção do filme de líquido são expressas por, respectivamente, u_L , u_G e $u_f(z_f)$. A fração de líquido do pistão de líquido, a fração de líquido média na seção do filme de líquido e a fração de líquido da unidade são definidas por, respectivamente, R_s , $R_f(z_f)$ e R_u . Adicionalmente, a fração de vazio do pistão de líquido, a fração de vazio média na seção do filme de líquido e a fração de vazio da unidade são simbolizadas por, respectivamente, α_s , $\alpha_f(z_f)$ e α_u . Complementarmente, a espessura média na seção do filme de líquido é representada por $h_f(z_f)$. Por fim, todas as propriedades são consideradas uniformes no pistão de líquido.

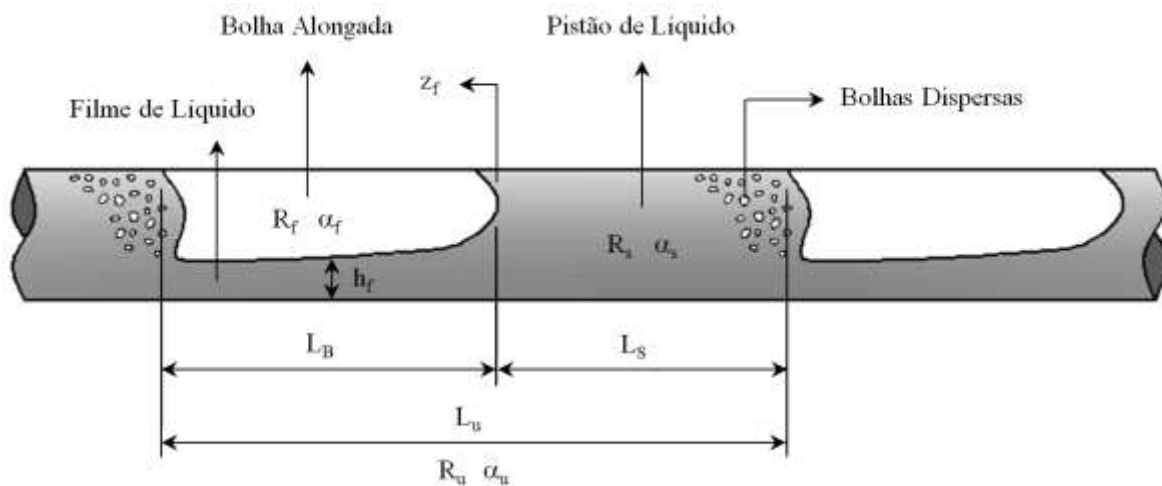


Figura 1.2. Representação esquemática da célula unitária.

Como a fração de líquido na bolha alongada varia ao longo do comprimento da bolha alongada, define-se as propriedades médias volumétricas em função da coordenada z_f no filme de líquido através da modelagem unidimensional.

A velocidade média volumétrica no filme de líquido é expressa em função da velocidade média na seção do filme de líquido, consoante à Equação 1.1:

$$\langle u_f \rangle = \frac{1}{L_B} \int_0^{L_B} u_f dz_f, \quad (1.1)$$

e a fração de líquido média volumétrica no filme de líquido é dada em função da fração de líquido média na seção do filme de líquido, conforme a Equação 1.2:

$$\langle R_f \rangle = \frac{1}{L_B} \int_0^{L_B} R_f dz_f. \quad (1.2)$$

A relação entre a fração de líquido média volumétrica do pistão de líquido e a fração de vazio média volumétrica do pistão de líquido é dada pela Equação 1.3:

$$\langle R_s \rangle = 1 - \langle \alpha_s \rangle. \quad (1.3)$$

A fração de líquido média volumétrica do filme de líquido relaciona-se com a fração de vazio média volumétrica do filme de líquido, conforme expresso na Equação 1.4:

$$\langle R_f \rangle = 1 - \langle \alpha_f \rangle. \quad (1.4)$$

Por fim, relação entre a fração de líquido média volumétrica da unidade e a fração de vazio média volumétrica da unidade é expressa pela Equação 1.5:

$$\langle R_u \rangle = 1 - \langle \alpha_u \rangle. \quad (1.5)$$

Como as velocidades superficiais de líquido e gás são suficientemente reduzidas para que o ar seja transportado unicamente pelas bolhas alongadas, têm-se pistões de líquido não aerados para os quatro testes experimentais executados, conforme exposto na Figura 5.2. Desse modo, a fração de vazio média volumétrica do pistão de líquido é nula e a fração de vazio média volumétrica da bolha alongada coincide com a fração de vazio média volumétrica da unidade. Por conveniência, a fração de vazio média volumétrica da unidade é denominada simplesmente por fração de vazio e simbolizada por α nas demais seções deste trabalho.

A velocidade superficial ou fluxo volumétrico é calculado pela relação entre a vazão volumétrica da fase e a área da seção transversal da tubulação. A velocidade superficial da fase líquida ou fluxo volumétrico da fase líquida é dado pela Equação 1.6:

$$J_L = \frac{Q_L}{A}, \quad (1.6)$$

onde J_L é a velocidade superficial da fase líquida ou fluxo volumétrico da fase líquida. A vazão volumétrica da fase líquida é simbolizada por Q_L e a área da seção transversal da tubulação é expressa por A . Similarmente, a velocidade superficial da fase gasosa ou fluxo volumétrico da fase gasosa é expresso pela Equação 1.7:

$$J_G = \frac{Q_G}{A}, \quad (1.7)$$

onde J_G é a velocidade superficial da fase gasosa ou fluxo volumétrico da fase gasosa e Q_G é a vazão volumétrica da fase gasosa.

A velocidade superficial de mistura, J , é definida pela Equação 1.8:

$$J = \frac{Q_L + Q_G}{A}. \quad (1.8)$$

Logo, a velocidade superficial de mistura é dada pela soma das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa, conforme Equação 1.9:

$$J = J_L + J_G. \quad (1.9)$$

A velocidade superficial da fase líquida está relacionada com a velocidade *in situ* da fase líquida, U_L , através da Equação 1.10:

$$J_L = (1 - \alpha_u) U_L, \quad (1.10)$$

enquanto a velocidade superficial da fase gasosa está associada com a velocidade *in situ* da fase gasosa, U_G , pela Equação 1.11:

$$J_G = \alpha_u U_G. \quad (1.11)$$

Se considerarmos que uma unidade propaga-se com a velocidade de translação do nariz da bolha alongada, seu deslocamento no espaço e no tempo está relacionado por $(x - u_T t) = \text{constante}$. Desse modo, pode-se associar os períodos ou tempos de residência da bolha alongada, do pistão de líquido e da unidade com, respectivamente, os comprimentos da bolha alongada, do pistão de líquido e da unidade, conforme exposto na Equação 1.12:

$$\begin{aligned} t_B &= \frac{L_B}{u_T}, \\ t_S &= \frac{L_S}{u_T}, \\ t_u &= \frac{L_u}{u_T}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

onde a velocidade de translação do nariz da bolha alongada é representada por u_T . Os períodos ou tempos de residência da bolha alongada, do pistão de líquido e da unidade são simbolizados por, respectivamente, t_B , t_S e t_u . Os comprimentos da bolha alongada, do pistão de líquido e da unidade são, respectivamente, L_B , L_S e L_u . O comprimento da unidade é definido pela soma dos comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido, consoante à Equação 1.13:

$$L_u = L_B + L_S . \quad (1.13)$$

A frequência de passagem de golfadas no padrão intermitente é expressa pelo inverso do período da unidade, conforme Equação 1.14:

$$f = \frac{1}{t_u} , \quad (1.14)$$

onde f é a frequência de passagem de golfadas e t_u é o período da unidade. O período da unidade é definido pela soma dos períodos da bolha alongada e do pistão de líquido, consoante à Equação 1.15:

$$t_u = t_B + t_S . \quad (1.15)$$

A frequência de passagem de golfadas também relaciona-se com a velocidade de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento da unidade, o comprimento da bolha alongada, o comprimento do pistão de líquido e o fator de intermitência, conforme apresentado na Equação 1.16:

$$\begin{aligned} f &= \frac{u_T}{L_u} , \\ f &= \frac{u_T \beta}{L_B} , \\ f &= \frac{u_T (1 - \beta)}{L_S} , \end{aligned} \quad (1.16)$$

onde β é o fator de intermitência definido pela relação entre os comprimentos da bolha alongada e da unidade ou pela relação entre os períodos da bolha alongada e da unidade, em concordância com a Equação 1.17:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{L_B}{L_u} , \\ \beta &= \frac{t_B}{t_u} . \end{aligned} \quad (1.17)$$

1.2 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho é dividido em seis capítulos e um apêndice, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1 - Introdução: Apresentam-se a introdução, a importância dos escoamentos multifásicos e os objetivos deste trabalho. Por fim, a nomenclatura básica e a estrutura da dissertação são descritas.
- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Destacam-se os estudos científicos relacionados exclusivamente às ondas de fração de vazio em escoamento bifásico no padrão intermitente e, em seguida, as investigações associadas unicamente às ondas de pressão. Por fim, salientam-se os estudos simultâneos das ondas de fração de vazio e de pressão em escoamento bifásico no padrão golfadas.
- Capítulo 3 - Aparato Experimental: Descrevem-se o aparato experimental, a instrumentação e o sistema de gerenciamento da seção de teste. Na sequência, o procedimento experimental para a execução dos testes é retratado.
- Capítulo 4 - Processamento de Dados e Análise de Incertezas: Os procedimentos para determinação das velocidades experimentais de propagação das ondas de fração de vazio e de pressão, bem como o processamento de dados para caracterização dos parâmetros geométricos e cinemáticos são exibidos. Por fim, tem-se a análise de incertezas das propriedades contínuas e discretas do escoamento intermitente.
- Capítulo 5 - Resultados Experimentais e Análise: As condições operacionais e a análise das imagens para os testes experimentais são expostas. Abordam-se os valores médios e a evolução temporal das propriedades contínuas e discretas do escoamento intermitente. Na sequência, tem-se a análise mecanicista das ondas de fração de vazio e de pressão. As velocidades experimentais das ondas de fração de vazio e de pressão são apresentadas. Por fim, as comparações entre os dados experimentais e os modelos e correlações de predição são desenvolvidas.
- Capítulo 6 - Conclusões: Revelam-se as conclusões obtidas e sugerem-se trabalhos futuros.
- Apêndice A - Análise de Incertezas: Descreve-se detalhadamente a análise de incertezas das propriedades contínuas e discretas do escoamento intermitente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica é dividida em três seções. Os estudos dedicados exclusivamente à onda de fração de vazio em escoamento bifásico no padrão intermitente estão descritos na primeira seção, enquanto a segunda seção apresenta os estudos relacionados unicamente à onda de pressão em escoamento bifásico no padrão golfadas. Por fim, a terceira seção expõe os artigos referentes à investigação simultânea das ondas de fração de vazio e de pressão em escoamento bifásico transiente no padrão intermitente.

2.1 Onda de Fração de Vazio em Escoamento Bifásico no Padrão Intermitente

A correlação cinemática de *drift-flux* proposta por Zuber e Findlay (1965) é usada extensivamente para o desenvolvimento de modelos matemáticos complexos, como os modelos de predição da onda de fração de vazio. O modelo cinemático de *drift-flux* é definido pela Equação 2.1:

$$U_G = C_0 J + u_{G,J}, \quad (2.1)$$

onde U_G é a velocidade *in situ* da fase gasosa e J é a velocidade superficial de mistura. O parâmetro de distribuição é simbolizado por C_0 e $u_{G,J}$ representa a velocidade de deslizamento.

Wallis (1969) propôs um modelo cinemático simples e engenhoso para a onda de fração de vazio. Wallis (1969) assumiu que a fase gasosa tem massa específica constante e, conseqüentemente, o balanço mássico para o gás se reduz à um balanço volumétrico, consoante à Equação 2.2:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial J_G}{\partial z} = 0, \quad (2.2)$$

onde a velocidade superficial da fase gasosa é dada por $J_G = \alpha U_G$. Considerando a derivada da velocidade superficial de gás em relação à fração de vazio, a Equação 2.2 pode ser expressa como uma equação hiperbólica *quasi*-linear, em concordância com a Equação 2.3:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + c_\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0, \quad (2.3)$$

onde c_α é a velocidade de propagação da onda de fração de vazio definida pela Equação 2.4, conforme sugerido por Whitham (1974):

$$c_\alpha = \frac{dJ_G}{d\alpha} \equiv U_G + \alpha \frac{dU_G}{d\alpha}. \quad (2.4)$$

Substituindo a Equação 2.1 em a_α da Equação 2.4, encontram-se duas velocidades de propagação, dependendo se a perturbação da fração de vazio é introduzida devido à variação infinitesimal da velocidade superficial de gás ou líquido. Se a velocidade superficial da fase gasosa varia, enquanto a velocidade superficial da fase líquida é mantida constante, usa-se a Equação 2.5:

$$c_\alpha^{N_G} = \frac{C_0 J_L + U_{G,J}}{(1 - C_0 \alpha)^2}. \quad (2.5)$$

Complementarmente, se a velocidade superficial da fase gasosa permanece inalterada, ao passo que a velocidade superficial da fase líquida é modificada, utiliza-se a Equação 2.6:

$$c_\alpha^{N_L} = \frac{J_G}{C_0 \alpha^2}. \quad (2.6)$$

As Equações 2.5 e 2.6 serão empregadas na comparação das velocidades experimentais com os modelos e correlações de predição da onda de fração de vazio, conforme exibido na Seção 5.7.

Pode-se encontrar um grande número de artigos dedicados à onda de fração de vazio no padrão bolhas dispersas, porém existem poucos estudos referentes ao padrão golfadas. Dentre eles, destacam-se dois trabalhos experimentais relacionados à propagação da onda de fração de vazio como critério de transição entre os padrões de escoamento bolhas dispersas e golfadas. Matuszkiewicz *et al.* (1987) estudaram a propagação das ondas espontâneas de fração de vazio em um duto vertical de seção quadrada com uma mistura bifásica ascendente de nitrogênio e água. A fração de vazio variou entre 0,1 e 0,5, incluindo a transição entre os padrões bolhas dispersas e golfadas. Matuszkiewicz *et al.* (1987) descobriram que a transição do padrão bolhas dispersas para o padrão golfadas está associada às instabilidades hidrodinâmicas da onda de fração de vazio, como a amplificação e a quebra da onda.

Saiz-Jabardo e Bouré (1989) aprofundaram os estudos de Matuszkiewicz *et al.* (1987) e analisaram a atenuação, a coerência e a velocidade de propagação da onda de fração de vazio. A seção de teste é composta por um tubo vertical com 25 mm de diâmetro interno e 2 m de comprimento. Os fluidos de teste foram nitrogênio e água. A investigação experimental abrangeu a propagação das ondas espontâneas de fração de vazio, bem como a propagação de perturbações induzidas por um pistão alternado. Para as frequências induzidas variando de

baixa para média, a velocidade da onda de fração de vazio apresentou um modo de propagação. Para as frequências variando de média para alta, dois modos de propagação coexistentes foram observados. Adicionalmente, para as frequências elevadas, apenas o modo de propagação de alta velocidade foi registrado. Esta constatação é a base para o desenvolvimento de um critério objetivo de transição entre os padrões bolhas dispersas e golfadas. Saiz-Jabardo e Bouré (1989) sugerem ainda que a velocidade da onda de fração de vazio no padrão golfadas é semelhante à velocidade de ascensão do nariz da bolha de Taylor.

Pauchon e Banerjee (1988) avaliaram a velocidade de propagação da onda de fração de vazio com base na formulação completa do modelo de dois fluidos. Contudo, Lisseter e Fowler (1992) propuseram simplificações no modelo de Pauchon e Banerjee (1988) e encontraram expressões algébricas mais simples com acurácia comparável às soluções exatas obtidas por Pauchon e Banerjee (1988). Ademais, Lisseter e Fowler (1992) estenderam a aplicação do modelo para o estudo da transição entre os padrões bolhas dispersas e golfadas. Fundamentado nos resultados do modelo simplificado, Lisseter e Fowler (1992) sugeriram que a velocidade da onda de fração de vazio no padrão intermitente é próxima à velocidade de ascensão do nariz da bolha de Taylor, corroborando a observação de Saiz-Jabardo e Bouré (1989).

2.2 Onda de Pressão em Escoamento Bifásico no Padrão Intermitente

A presença de pequenas quantidades de gás em um líquido reduz significativamente a velocidade de propagação da onda de pressão através da mistura bifásica. O estudo da onda de pressão iniciou-se nos anos 1960 motivado pelo avanço da energia nuclear e pela necessidade de sistemas de segurança confiáveis.

Uma investigação detalhada sobre a velocidade de propagação da onda de pressão em vários padrões de escoamento foi executada por Henry *et al.* (1971). O padrão intermitente foi idealizado como sendo uma sequência alternada de elementos líquidos e gasosos ocupando toda a seção transversal do tubo, denominados *plugs*. A velocidade de propagação da onda de pressão de uma unidade constituída por um elemento líquido e um elemento gasoso é definida pela média das velocidades de propagação da onda de pressão nas regiões líquida e gasosa ponderada pelo fator de intermitência, conforme exposto na Equação 2.7:

$$c_P = \left(\frac{\beta}{c_{P,G}} + \frac{1-\beta}{c_{P,L}} \right)^{-1}, \quad (2.7)$$

onde a velocidade de propagação da onda de pressão nos *plugs* gasoso e líquido são, respectivamente, $c_{P,G}$ e $c_{P,L}$. O fator de intermitência é simbolizado por β e definido pela relação entre o comprimento do elemento gasoso e o comprimento da unidade, consoante à Equação 1.17, sendo o comprimento da unidade expresso pela soma dos comprimentos dos elementos líquido e gasoso. Entretanto, uma limitação do modelo proposto por Henry *et al.* (1971) baseia-se na negligência da atenuação severa da onda de pressão durante a passagem do *plug* líquido para o *plug* gasoso devido à diferença de impedância acústica entre as fases.

Henry *et al.* (1971) adquiriram os dados experimentais em uma seção de teste constituída por um tubo vertical com 50,8 mm de diâmetro interno e 22 D de comprimento livre. Os fluidos de teste foram ar e água à pressão absoluta de 170 kPa. A condição inicial dos testes experimentais era uma unidade estática composta por um *plug* de ar na região superior da seção de teste e um *plug* de água na região inferior. A investigação experimental foi executada para diversos níveis de água no interior da seção de teste e as ondas de expansão e compressão foram introduzidas através da ruptura de uma membrana. A estimativa da velocidade de propagação da onda de pressão dada pela Equação 2.7 foi comparada favoravelmente com os dados experimentais de Henry *et al.* (1971).

Martin e Padmanabhan (1979) estudaram numericamente e experimentalmente a velocidade de propagação da onda de pressão no padrão golfadas. Os dados experimentais alcançados por Martin e Padmanabhan (1979) foram comparados com o modelo acústico de escoamento homogêneo proposto por Henry *et al.* (1971) e com os autovalores obtidos a partir do modelo numérico de *drift-flux*. Os testes experimentais foram executados em um tubo horizontal de cobre de 13,4 mm de diâmetro interno e 102 m de comprimento operando com água e ar. Uma vez que o escoamento intermitente estava estabilizado, a onda de pressão era introduzida através do fechamento da válvula de saída da seção de teste. Complementarmente, a abordagem numérica consiste na resolução do escoamento transiente no padrão intermitente empregando o modelo de *drift-flux*. O sistema de equações de transporte é hiperbólico com três autovalores reais e distintos avaliados numericamente. Martin e Padmanabhan (1979) demonstraram que a combinação linear dos autovalores mais rápidos coincide com a velocidade de propagação da onda de pressão em uma mistura homogênea, conforme a Equação 2.8, o que ratifica o trabalho de Henry *et al.* (1971):

$$\frac{c_P}{c_{P,G}} = \left\{ \sqrt{\alpha(1-\alpha)\frac{\rho_L}{\rho_G} + \alpha^2 + \left(\frac{c_{P,G}}{c_{P,L}}\right)^2 \left[(1-\alpha)^2 + \alpha(1-\alpha)\frac{\rho_G}{\rho_L} \right]} \right\}^{-1}, \quad (2.8)$$

onde α é a fração de vazio, ρ_L representa a massa específica da fase líquida e ρ_G é a massa específica da fase gasosa. Considerando-se as condições operacionais expressas pela Equação 2.9:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_G}{\rho_L} &\ll 1, \\ c_{P,G}^2 &= \frac{kP}{\rho_G}, \\ \left(\frac{c_{P,G}}{c_{P,L}}\right)^2 &\ll 1, \end{aligned} \quad (2.9)$$

onde P é a pressão absoluta e k denota o coeficiente politrópico, Martin e Padmanabhan (1979) simplificaram a Equação 2.8 e encontraram a Equação 2.10:

$$a_P \cong \sqrt{\frac{kP}{\rho_L \alpha (1-\alpha)}}. \quad (2.10)$$

Além disso, Martin e Padmanabhan (1979) mostraram que a velocidade de propagação da onda de pressão é significativamente menor que os valores previstos pela Equação 2.7 e ligeiramente maior que a estimativa do modelo de escoamento homogêneo adiabático dado pela Equação 2.10 com o coeficiente k isoentrópico igual a 1,4, uma vez que considera-se o ar como gás ideal.

Matsui *et al.* (1979) empregaram o padrão golfadas idealizado por Henry *et al.* (1971) na modelagem de uma sequência de bolhas alongadas e pistões de líquido por meio da analogia massa-mola, considerando a inércia da fase líquida e a compressibilidade da fase gasosa. O modelo analítico massa-mola revelou que a onda de pressão é dispersiva com velocidade de propagação dada pela Equação 2.11:

$$c_P = \sqrt{\frac{kP}{\rho_L \beta (1-\beta)}}. \quad (2.11)$$

A Equação 2.11 coincide com a velocidade de propagação para escoamento homogêneo mostrada na Equação 2.10, se o fator de intermitência for substituído pela fração de vazio da unidade.

O aparato experimental utilizado por Matsui *et al.* (1979) consiste em um tubo de choque com diâmetro interno de 5 mm operando com ar e água. Os comprimentos das

câmaras de baixa e alta pressão são, respectivamente, 2040 mm e 1000 mm. Os *plugs* líquidos e gasosos são facilmente formados no interior da câmara de baixa pressão devido ao pequeno diâmetro do tubo. Os efeitos de compressibilidade foram testados alterando as condições operacionais no interior da câmara de baixa pressão entre 1 e 20 unidades. Os resultados experimentais mostraram que a onda de pressão apresenta forma dispersiva.

Ademais, Matsui *et al.* (1979) propõem a coexistência de uma onda de pressão rápida e uma onda de pressão lenta. A onda de pressão rápida segue a Equação 2.7 proposta por Henry *et al.* (1971) e é praticamente imperceptível, visto que a velocidade da onda de pressão rápida varia entre 340 m/s e 910 m/s para um sistema ar-água. Percebeu-se ainda a forte atenuação da onda de pressão durante a propagação do *plug* líquido para o *plug* gasoso devido à diferença de impedância acústica entre as fases. Por outro lado, a onda de pressão lenta acompanha a Equação 2.11 e apresenta velocidade de propagação uma ordem de grandeza menor do que a velocidade da onda de pressão rápida. As estimativas da Equação 2.11 são simétricas em relação ao fator de intermitência e a velocidade de propagação mínima ocorre para o fator de intermitência igual a 0,5.

Nguyen *et al.* (1981) propuseram expressões analíticas simplificadas para a propagação das perturbações de pressão em escoamento gás-líquido fundamentados no comportamento físico da onda acústica em escoamento monofásico e a influência da elasticidade da parede do duto. Contudo, Nguyen *et al.* (1981) utilizaram o padrão golfadas idealizado por Henry *et al.* (1971) e a Equação 2.7 para a estimativa da velocidade de propagação da onda de pressão em escoamento intermitente.

Legius *et al.* (1997) mediram a velocidade de propagação da onda de pressão em escoamento ascendente no padrão golfadas. O aparato experimental é composto por uma linha vertical de 17 m de altura, sendo que a seção de teste vertical com 50 mm de diâmetro interno está localizada nos 10 m superiores. As perturbações de pressão são induzidas através de uma linha secundária de injeção de ar controlada por uma válvula de fechamento rápido. Legius *et al.* (1997) usaram o modelo homogêneo proposto por Nguyen *et al.* (1981) para determinar a velocidade da onda de pressão no padrão intermitente, conforme expresso na Equação 2.12:

$$\frac{1}{c_p} = (1 - \alpha) \sqrt{\frac{(1 - \alpha)}{c_{p,L}^2} + \frac{\rho_L \alpha}{\rho_G c_{p,G}^2}} + \alpha \sqrt{\frac{(1 - \alpha) \rho_G}{c_{p,L}^2 \rho_L} + \frac{\alpha}{c_{p,G}^2}}. \quad (2.12)$$

A Equação 2.12 superestima as velocidades experimentais em aproximadamente 10 m/s, o que representa uma diferença de 50% entre os dados experimentais e as estimativas do modelo.

Com base no modelo de dois fluidos, Lee *et al.* (1998) introduziram um termo interfacial capaz de converter as equações de transporte em um sistema hiperbólico. A partir da análise dos autovalores, Lee *et al.* (1998) propuseram a Equação 2.13 para modelar a velocidade de propagação da onda de pressão no padrão golfadas:

$$c_p = \left(\frac{\alpha}{c_{p,G}} + \frac{1-\alpha}{c_{p,L}} \right)^{-1}. \quad (2.13)$$

Observa-se que a diferença entre a Equação 2.7 e a Equação 2.13 consiste na substituição do fator de intermitência pela fração de vazio da unidade. No entanto, pode-se prever que as estimativas dadas pela Equação 2.13 estão próximas da velocidade de propagação da onda de pressão rápida abordada por Matsui *et al.* (1979).

Xu *et al.* (2008) utilizaram o modelo de dois fluidos e empregaram um coeficiente de massa virtual para transformar as equações de conservação em um sistema hiperbólico. Xu *et al.* (2008) determinaram os autovalores reais e, em seguida, associaram os valores encontrados com a velocidade de propagação. Para o padrão golfadas, Xu *et al.* (2008) propuseram a Equação 2.14 para modelar a velocidade da onda de pressão:

$$c_p = \pm \sqrt{\frac{\frac{C_{VM}\rho_L}{\alpha(1-\alpha)^2} + \frac{\rho_G}{\alpha} + \frac{\rho_L}{1-\alpha}}{\left(\frac{\rho_L}{(1-\alpha)c_{p,G}} + \frac{\rho_G}{\alpha c_{p,L}} \right) \left[1 + C_{VM} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \right]}}, \quad (2.14)$$

onde o C_{VM} é coeficiente de massa virtual no padrão golfadas definido pela Equação 2.15:

$$C_{VM} = 3,3 + 1,7 \frac{1 - \frac{\sqrt{\alpha}}{15}}{1 - \frac{\sqrt{\alpha}}{45}}. \quad (2.15)$$

2.3 Ondas de Fração de Vazio e de Pressão em Escoamento Bifásico Transiente no Padrão Intermitente

O projeto e operação de linhas de escoamento transiente multifásico na indústria petrolífera impulsionou o desenvolvimento de códigos computacionais durante a década de 1990. Ao longo deste período, produziram-se inúmeros dados experimentais em diversos padrões de escoamento para avaliar a confiabilidade dos códigos computacionais criados.

Entretanto, realizaram-se poucos estudos focados no escoamento transiente bifásico no padrão intermitente.

Vigneron *et al.* (1995) realizaram testes experimentais em escoamento transiente bifásico usando uma linha horizontal com 77,9 mm de diâmetro interno e 420 m de comprimento. Os fluidos de teste foram ar e querosene à pressão aproximadamente atmosférica. Um dos principais objetivos era disponibilizar dados experimentais para a validação dos códigos computacionais de escoamentos bifásicos transientes. Os parâmetros medidos foram a vazão de entrada das fases líquida e gasosa, a vazão de saída da fase líquida, a pressão absoluta, a temperatura e a fração volumétrica da fase líquida. A matriz de teste consistiu em 18 condições operacionais abrangendo os padrões estratificado liso, estratificado ondulado e intermitente. Em relação ao escoamento transiente no padrão golfadas, Vigneron *et al.* (1995) destacaram que a onda de fração de vazio propaga-se aproximadamente com a velocidade de translação do nariz da bolha alongada calculada pela Equação 2.1 empregando as propriedades do estado final e desprezando o termo de deslizamento.

King *et al.* (1998) estudaram o escoamento transiente no padrão golfadas com variação da vazão volumétrica de uma das fases. A seção de teste é composta por um tubo horizontal com 78 mm de diâmetro interno e 36 m de comprimento. Os fluidos de teste foram ar e água próximos da pressão atmosférica. As alterações no escoamento bifásico foram produzidas através do aumento ou redução da vazão volumétrica de uma das fases na entrada da seção de teste. Os dados experimentais obtidos foram a evolução temporal da pressão, da vazão volumétrica de entrada das fases líquida e gasosa, além da fração volumétrica na entrada e a 35 m à jusante da entrada da seção de teste. King *et al.* (1998) ressaltaram que a pressão de entrada apresenta *overshoot* nos testes experimentais com acréscimo da velocidade superficial de gás, enquanto a pressão de entrada exibe *undershoot* nos testes experimentais com diminuição da velocidade superficial de gás. Adicionalmente, King *et al.* (1998) enfatizaram que os escoamentos transientes induzidos por alterações da fase líquida exibem variações de pressão estáveis entre os estados inicial e final.

Por fim, Fabre *et al.* (1995) foram os primeiros a abordarem simultaneamente as características das ondas de fração de vazio e de pressão em escoamento transiente bifásico no padrão golfadas. Como não se encontrou outra investigação experimental semelhante, acredita-se que o estudo realizado por Fabre *et al.* (1995) seja o único disponível na literatura. O aparato experimental é composto por um tubo horizontal com 50 mm de diâmetro interno e 90 m de comprimento. Os fluidos de teste foram ar e água próximos da pressão atmosférica. As perturbações no escoamento bifásico foram introduzidas por alterações súbitas de uma das

fases na entrada da seção de teste ou por variações bruscas na abertura da válvula de saída. A vazão da fase líquida na entrada e na saída da seção de teste, bem como a pressão e a fração de vazio em quatro estações de medição foram registradas. Fabre *et al.* (1995) salientaram que a onda de pressão é reconhecida através de uma única aquisição. Por outro lado, a aplicação do processo de média de conjunto nos dados experimentais é necessária para identificar a onda de fração de vazio devido ao comportamento intermitente intrínseco do escoamento no padrão golfadas. Ademais, Fabre *et al.* (1995) revelaram que a onda de fração de vazio apresenta forma conservativa, propaga-se com velocidade constante e próxima à velocidade de translação do nariz da bolha alongada. Por outro lado, a onda de pressão é dispersiva e fortemente atenuada ao longo da seção de teste. Observou-se ainda que o estado final é alcançado apenas quando a onda de fração de vazio atingir a saída da seção de teste.

A revisão bibliográfica destaca a falta de estudos experimentais sobre a forma, a atenuação e a velocidade de propagação das ondas de fração de vazio e de pressão no padrão intermitente. Investigações experimentais sobre o acoplamento das ondas de fração de vazio e de pressão em escoamentos bifásicos motivaram estudos científicos detalhados em diversos padrões de escoamento. Entretanto, encontrou-se um único estudo experimental simultâneo das ondas de fração de vazio e de pressão no padrão intermitente, Fabre *et al.* (1995).

Uma das razões para a escassez de estudos experimentais no padrão intermitente pode estar relacionada às dificuldades adicionais na obtenção das propriedades das ondas no padrão intermitente em comparação com os demais padrões de escoamento. Os obstáculos inerentes da abordagem experimental no padrão golfadas estão associados à passagem alternada de pistões de líquido e bolhas alongadas e à interação não linear entre as estruturas constituintes, o que causam constantes perturbações no escoamento. Portanto, para caracterizar as ondas de fração de vazio e de pressão em escoamento bifásico transiente no padrão golfadas, faz-se necessário empregar o processo de média de conjunto para filtrar o comportamento intermitente da fração de vazio e da pressão, consoante ao descrito na Seção 4.1. Ressalta-se ainda que mesmo em regime permanente, o escoamento bifásico no padrão golfadas apresenta comportamento intrinsecamente intermitente devido à alternância das estruturas líquida e gasosa. Desse modo, o presente trabalho pretende suprir a lacuna deixada pelos estudos anteriores e ampliar o conhecimento sobre o escoamento bifásico transiente de gás e líquido no padrão intermitente.

3 APARATO EXPERIMENTAL

A descrição do aparato experimental está exibida na primeira seção deste capítulo. A instrumentação e o sistema de gerenciamento estão expostos, respectivamente, na segunda e terceira seção. Por fim, a quarta seção apresenta o procedimento experimental.

3.1 Descrição do Aparato Experimental

O aparato experimental está instalado no Laboratório de Escoamento Bifásico do *Two-Phase Flow Group* (2PFG), exposto na Figura 3.1, no Departamento de Energia (DE) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A Figura 3.1 apresenta a vista aérea da linha de escoamento bifásico gás-líquido com comprimento total de 26,24 m, compreendido entre o injetor de correntes paralelas e o tanque de descarga, além do posicionamento das quatro estações de medição.

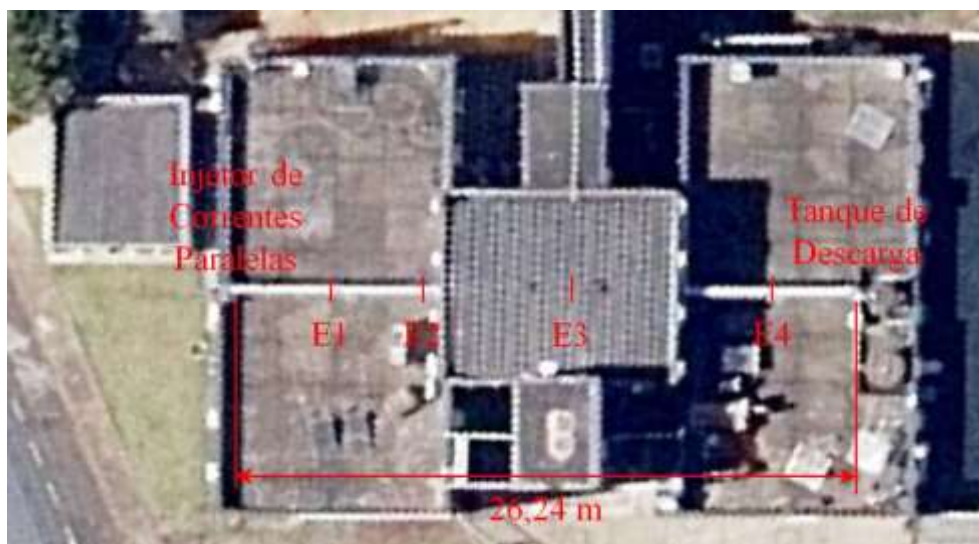


Figura 3.1. Fotografia aérea do Laboratório de Escoamento Bifásico do *Two-Phase Flow Group*. Fonte: Google Maps®.

O aparato experimental utilizado na medição das propriedades do escoamento horizontal transiente de ar e água no padrão golfadas, apresentado esquematicamente na Figura 3.2, pode ser dividido em três partes:

- Linha de suprimento de gás;
- Linha de suprimento de líquido;
- Linha de escoamento bifásico gás-líquido.

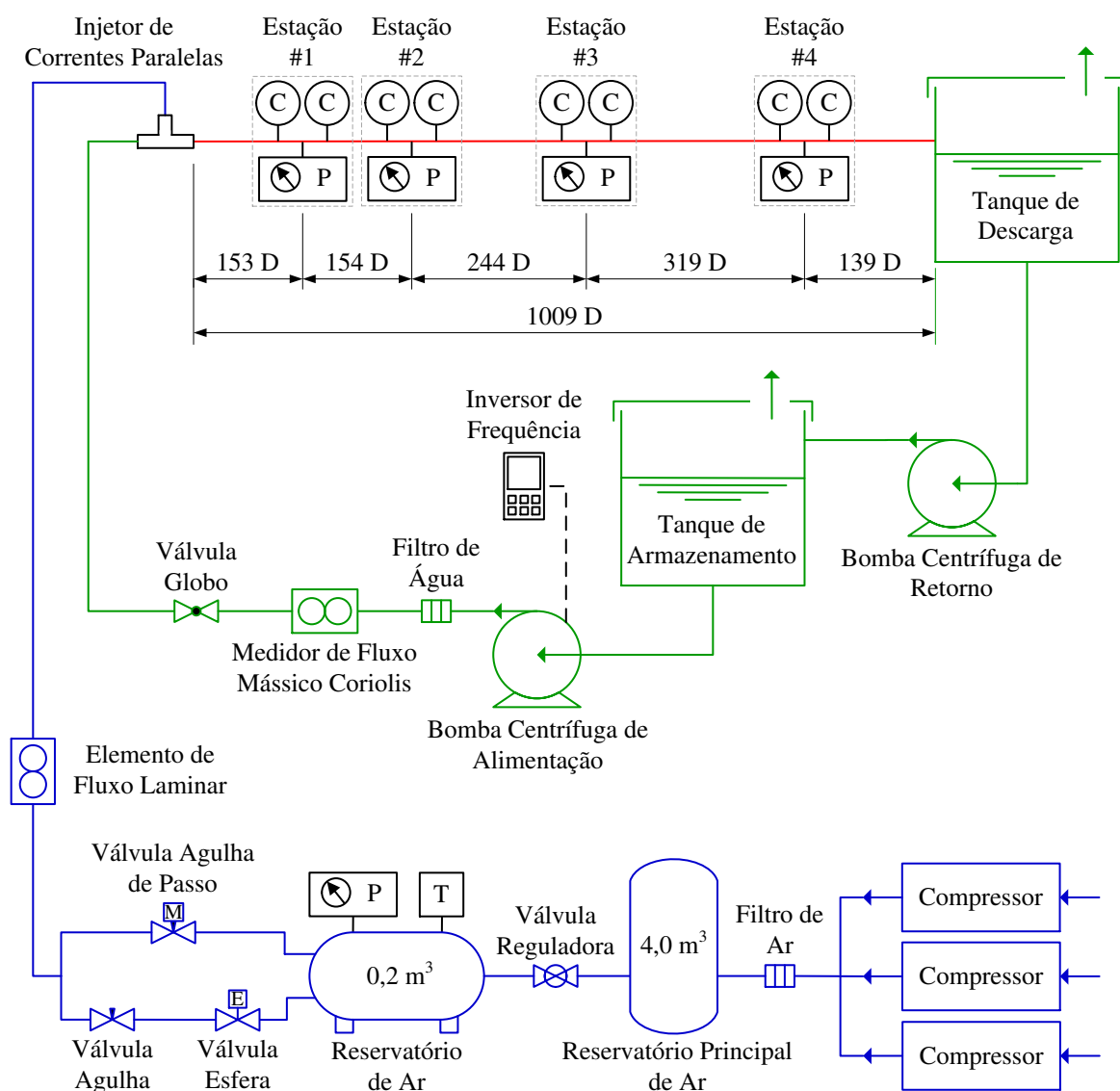


Figura 3.2. Representação esquemática do aparato experimental.

A linha de suprimento de gás é alimentada por até três compressores modelo W 960 fabricados pela Wetzel[®] em paralelo, cuja vazão volumétrica máxima é de $8,49 \times 10^{-2} \text{ Nm}^3/\text{s}$ à pressão máxima de operação de 1206 kPa. O ar comprimido passa por um filtro antes de ser admitido no reservatório principal de ar com capacidade de 4 m^3 e por uma válvula reguladora de pressão para então ser armazenado no reservatório pressurizado a 200 kPa com capacidade de $0,2 \text{ m}^3$. A pressão manométrica e temperatura do reservatório são monitoradas, respectivamente, por um transdutor de pressão SMAR[®] modelo LD301 e um transmissor de

temperatura SMAR[®] modelo TT301 acoplado a um termopar tipo T. A pressão manométrica e temperatura medidas são utilizadas na determinação da massa específica do ar e, conseqüentemente, da vazão mássica do ar. O reservatório possui duas tubulações de saída, sendo a primeira regulada por uma válvula agulha acionada remotamente por um motor de passo e a segunda controlada por uma válvula esfera de fechamento rápido acionada pneumaticamente e por uma válvula agulha, conforme exposto na Figura 3.3. As válvulas agulha, especialmente a controlada pelo motor de passo, permitem o controle minucioso da vazão volumétrica de gás, enquanto a válvula de fechamento rápido possibilita a variação brusca da velocidade superficial da fase gasosa e, conseqüentemente, o início do período transiente no escoamento bifásico. Optou-se por uma válvula do tipo esfera de abertura pneumática e fechamento por mola modelo GNP-24 S4 fabricada pela Genebre[®] com tempo médio de resposta de 12 ms. Em seguida, o ar comprimido é direcionado para um elemento de fluxo laminar modelo 50MW20-2 fabricado pela Meriam[®], cuja vazão volumétrica máxima medida é de $1,88 \times 10^{-2} \text{ Nm}^3/\text{s}$, consoante ao manual do fabricante. Por fim, o gás é conduzido ao injetor de correntes paralelas.

A linha de suprimento de líquido é composta por um tanque de armazenamento com capacidade de 3 m^3 e uma bomba centrífuga de alimentação modelo Meganorm Bloc 25-150 fabricada pela KSB[®], com vazão volumétrica máxima de $4,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. A vazão volumétrica desejada de líquido e as variações súbitas necessárias para a ocorrência do período transiente são obtidas pelo controle da rotação da bomba centrífuga através do inversor de frequência modelo CFW08 fabricado pela WEG[®]. A água passa por um filtro e por um medidor de fluxo mássico do tipo Coriolis modelo RHM15 fabricado pela Metroval[®] com faixa de medição entre $6,66 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ e $3,33 \text{ kg/s}$ e pressão máxima de operação de 10 MPa, segundo manual do fabricante. Em seguida, a vazão volumétrica de água é regulada através de uma válvula globo e conduzida até o injetor de correntes paralelas.

A linha de escoamento bifásico gás-líquido inicia-se no injetor de correntes paralelas, exposto na Figura 3.4. O injetor de correntes paralelas é composto por um tubo de acrílico transparente com diâmetro interno de 0,026 m dividido longitudinalmente por uma placa também de acrílico com 0,26 m de comprimento. O fluxo de gás possui ângulo de penetração de 90° em relação ao fluxo horizontal de líquido. Esta configuração permite a formação de dois canais separados, sendo o ar conduzido pelo canal superior e a água transportada pelo canal inferior. Em seguida, as correntes de ar e água encontram-se, originando o escoamento bifásico gás-líquido.



Figura 3.3. (a) Reservatório de ar comprimido; (b) válvula agulha e válvula esfera de fechamento rápido; (c) válvula agulha controlada por motor de passo e (d) motor de passo.



Figura 3.4. Injetor de correntes paralelas.

Investigou-se o escoamento bifásico gás-líquido por meio de uma seção de teste constituída por um tubo liso horizontal de acrílico transparente com diâmetro interno de 0,026 m e comprimento de 26,24 m. A tubulação horizontal, apresentada na Figura 3.5, é construída

com segmentos de tubo conectados por anéis de vedação e uniões de policloreto de polivinila, mais conhecido pelo acrônimo PVC, garantindo a continuidade do fluxo sem interferência. Cada segmento de tubo é suportado por três apoios telescópicos permitindo o nivelamento da linha e atenuação das vibrações inerentes ao escoamento intermitente.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.5. (a) Tubulação horizontal da seção de teste; (b) união; (c) união flangeada e (d) suporte telescópico.

O término da seção de teste ocorre no tanque de descarga com capacidade de 3 m^3 à pressão atmosférica. O ar é separado e ventilado para a atmosfera, enquanto o líquido é recirculado para o tanque de armazenamento com auxílio da bomba centrífuga de retorno

modelo Meganorm 40-160 fabricada pela KSB[®], com vazão volumétrica máxima de $2,36 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$.

Instrumentou-se o aparato experimental com transdutores de pressão e sensores de condutância dispostos em quatro estações de medição ao longo da tubulação horizontal. As quatro estações de medição estão localizadas a 3,980 m, 7,975 m, 14,315 m e 22,615 m à jusante do injetor de correntes paralelas, correspondendo, respectivamente, a 153 D, 307 D, 551 D e 870 D. Cada estação de medição é composta por dois sensores de condutância reportados em Rosa *et. al* (2010) e um transdutor de pressão SMAR[®] modelo LD301, conforme demonstrado na Figura 3.6. Os dois sensores de condutância estão espaçados axialmente 112,5 mm entre si e o transdutor de pressão está situado no ponto médio. Os sensores de condutância captam a ocorrência de gás e líquido, enquanto os transdutores de pressão registram a evolução temporal da pressão durante os testes.



Figura 3.6. Estação de medição com dois sensores de condutância e um transdutor de pressão.

Na análise visual do escoamento intermitente, utilizou-se uma câmera de alta velocidade modelo Motion[®] Xtra N3, juntamente com o programa de aquisição de imagens Motion[®] Studio desenvolvidos pela Integrated Desing Tools[®]. Posicionou-se a câmera 572 D à jusante do injetor de correntes paralelas operando à frequência de aquisição de 120 Hz e tempo de amostragem de 45 s.

3.2 Instrumentação

A instrumentação do aparato experimental compreende, basicamente, três tipos de sensores:

- Sensor de condutância desenvolvidos pelo grupo de pesquisa 2PFG;
- Transdutor de pressão SMAR[®] modelo LD301;
- Transmissor de temperatura SMAR[®] modelo TT301.

3.2.1 Sensor de Condutância

O sensor de condutância, representado esquematicamente na Figura 3.7, é composto por uma haste metálica com $6,0 \times 10^{-4}$ m de espessura posicionada verticalmente no centro de um tubo cilíndrico metálico. A haste está em contato direto com a mistura de gás e líquido, porém suas extremidades estão eletricamente isoladas. O tubo metálico é responsável pela blindagem da haste em relação aos ruídos eletromagnéticos externos, além de ser o referencial do circuito elétrico. A detecção das fases ocorre devido à diferença entre as condutâncias elétricas das fases gasosa e líquida, e o sinal obtido é proporcional à concentração volumétrica do meio bifásico. A descrição detalhada dos sensores de condutância encontra-se em Rosa *et al.* (2010).

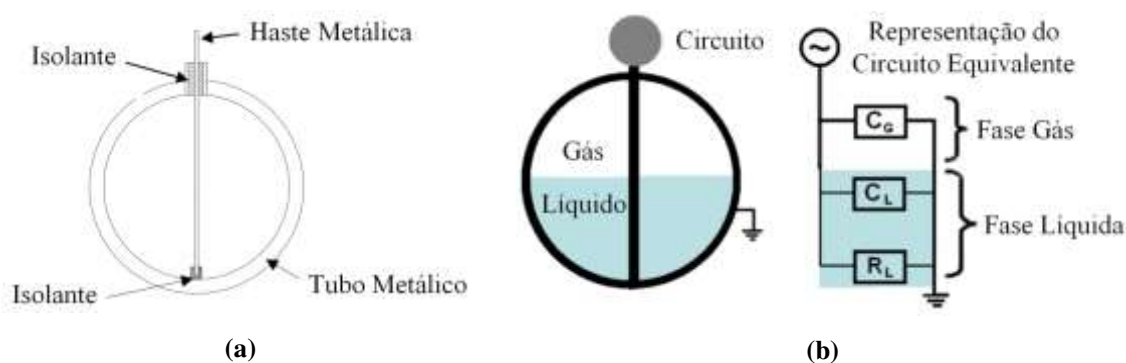


Figura 3.7. (a) Representação esquemática do sensor de condutância e (b) representação do circuito equivalente.

Segundo Rosa *et al.* (2010), uma previsão do comportamento do instrumento pode ser realizada identificando as diferentes componentes da condutância elétrica. Considera-se que a

fase gasosa contribui com uma componente, a capacitância C_G entre a haste e o gás, ao passo que a fase líquida pode possuir duas componentes, uma capacitiva C_L e outra resistiva R_L . A condutância elétrica do circuito pode ser puramente capacitiva, se a fase líquida for óleo, ou puramente resistiva, se a fase líquida for água.

3.2.2 Transdutor de Pressão

Utilizaram-se transdutores de pressão SMAR[®] modelo LD301 na medição da pressão manométrica na linha de suprimento de gás e nas quatro estações de medição da seção de teste. Segundo manual do fabricante, o transdutor de pressão SMAR[®] modelo LD301 apresenta tempo estimado de resposta de 10 ms, corrente de saída variando entre 4 e 20 mA com resolução de 0,75 μ A e capacidade de medição bidirecional. Calibraram-se os transdutores de pressão para diferentes faixas de operação com o intuito de melhorar a discretização das medições.

3.2.3 Transmissor de Temperatura

Mediu-se a temperatura do ar no reservatório de ar comprimido por meio do transmissor de temperatura SMAR[®] modelo TT301 acoplado a um termopar tipo T. Conforme informado no manual do fabricante, o transmissor de temperatura SMAR[®] modelo TT301 possui corrente de saída variando entre 4 e 20 mA com resolução de 1,5 μ A, comunicação digital direta e processador matemático dedicado.

3.3 Sistema de Gerenciamento

O sistema de gerenciamento pode ser dividido em dois módulos:

- Módulo de monitoramento dos fluidos de teste;
- Módulo de aquisição de dados.

O controle das vazões das fases líquida e gasosa é realizado através do módulo de monitoramento dos fluidos de teste, enquanto o módulo de aquisição de dados tem como função armazenar os sinais dos sensores de condutância e dos transdutores de pressão instalados na seção de teste.

3.3.1 Módulo de Monitoramento dos Fluidos de Teste

O módulo de monitoramento dos fluidos de teste, apresentado na Figura 3.8, registra os dados obtidos pelo elemento de fluxo laminar Meriam® 50MW20-2 e pelo medidor de fluxo mássico do tipo Coriolis Metroval® RHM15, além do transdutor de pressão e o transmissor de temperatura instalados no reservatório de ar comprimido, à frequência de amostragem de 2 Hz. O controle do motor de passo acoplado à válvula agulha, da válvula esfera de fechamento rápido acionada pneumaticamente e do inversor de frequência também são executados pelo módulo de monitoramento através da aquisição e emissão remota de sinais analógicos e digitais.

A conexão do elemento de fluxo laminar, do medidor de fluxo mássico, do transdutor de pressão e do transmissor de temperatura com o módulo de leitura ADAM-4017 é efetuada através de sinais analógicos de corrente elétrica entre 4 e 20 mA. A comunicação do motor de passo acoplado à válvula agulha, da válvula de fechamento rápido e do inversor de frequência com o módulo de escrita ADAM-4024 é executada por meio de sinais analógicos de tensão elétrica entre 1 e 5 V. Tanto o módulo de leitura ADAM-4017 quanto o módulo de escrita ADAM-4024 interligam-se com o módulo conversor ADAM-4561 através da rede de comunicação digital RS-485. A conexão entre o módulo conversor ADAM-4561 e o computador central é realizada pela rede de comunicação digital RS-232. Os três módulos ADAM utilizados são compostos por dispositivos de aquisição microprocessados desenvolvidos pela Advantech®. Os dois padrões de comunicação operam com transmissão diferencial de dados e protocolo aberto ASCII, possibilitando a comunicação entre vários elementos de uma mesma rede de dados.

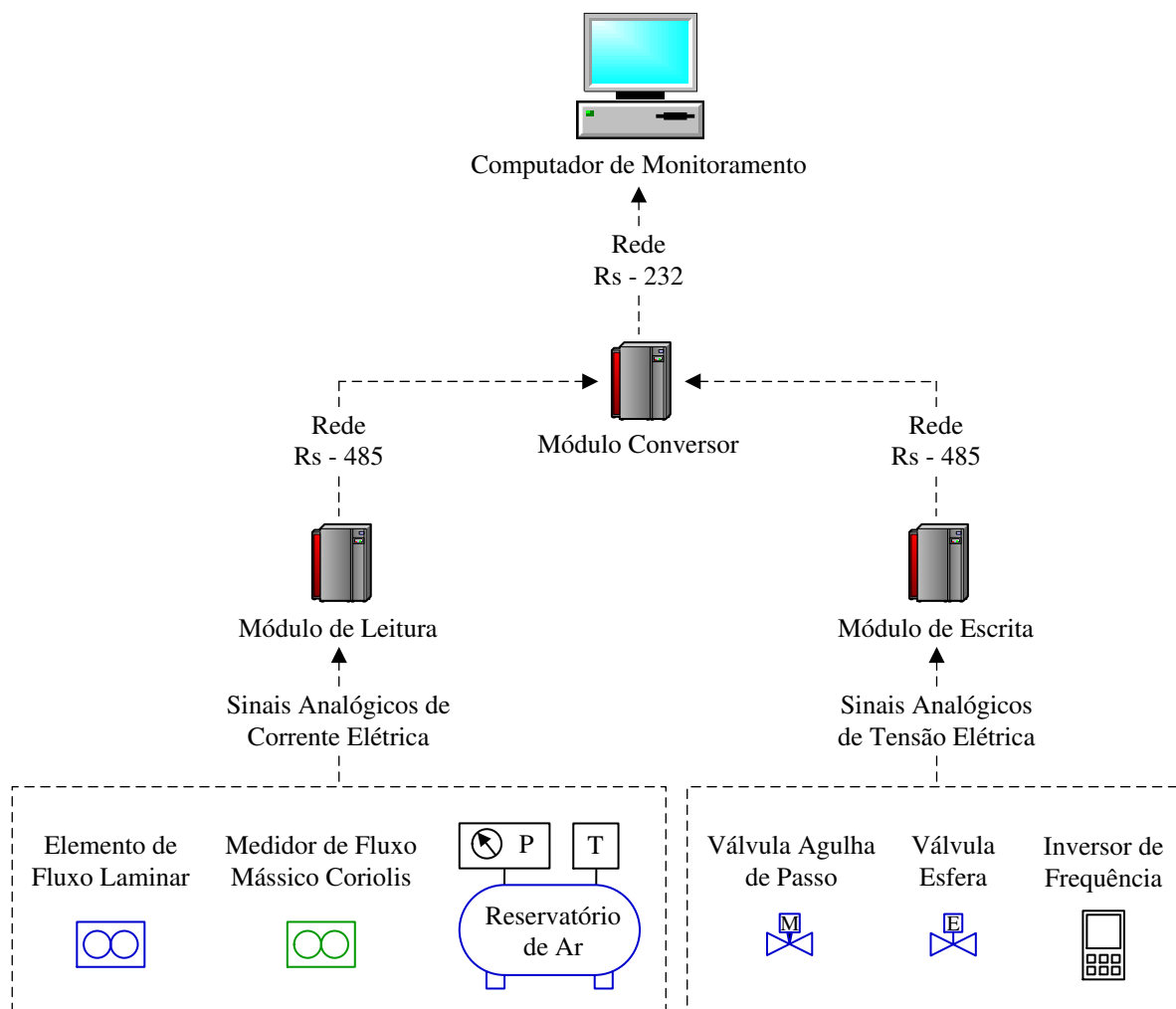


Figura 3.8. Representação esquemática do módulo de monitoramento dos fluidos de teste.

No monitoramento dos fluidos de teste, empregou-se o programa computacional Supervisório desenvolvido pelo grupo de pesquisa 2PFG em ambiente LabVIEW[®]. Na interface gráfica do programa Supervisório, exposta na Figura 3.9, observam-se a velocidade superficial de líquido, J_L , e a velocidade superficial de gás, J_G . O controle da frequência instantânea de operação do inversor de frequência acoplado ao motor elétrico da bomba centrífuga de alimentação, da abertura da válvula agulha acionada por motor de passo e da abertura da válvula esfera de fechamento rápido com acionamento pneumático são executados remotamente. Os dados oriundos do elemento de fluxo laminar Meriam[®] 50MW20-2 e do medidor de fluxo mássico Metroval[®] RHM15 são sincronizados com a aquisição de dados. As evoluções temporais da velocidade superficial da fase líquida, da pressão absoluta da linha e da pressão diferencial do elemento de fluxo laminar podem ser acompanhadas simultaneamente no gráfico central da interface gráfica do programa computacional Supervisório.



Figura 3.9. Interface gráfica do programa computacional Supervisório.

3.3.2 Módulo de Aquisição de Dados

Os transdutores de pressão e sensores de condutância instalados na seção de teste estão conectados por sinais analógicos de corrente ao chassi de aquisição de dados SCXI-1000 da National Instruments®, operando simultaneamente em doze canais à frequência de amostragem de 3000 Hz, conforme ilustrado na Figura 3.10.

Os sinais analógicos de corrente elétrica oriundos dos sensores são transformados em tensão através do multiplexador SCXI-1600 e do conversor analógico digital SCXI-1308, também fabricados pela National Instruments®, e instalados no chassi de aquisição de dados SCXI-1000. O conversor analógico digital possui um resistor de 250 ohms em cada canal de comunicação para conversão do sinal de corrente elétrica entre 4 mA e 20 mA em valores de tensão elétrica entre 1 V e 5 V, enquanto o multiplexador é responsável pela seleção dos canais de aquisição. O chassi de aquisição transmite os dados por um canal USB ao computador de aquisição.

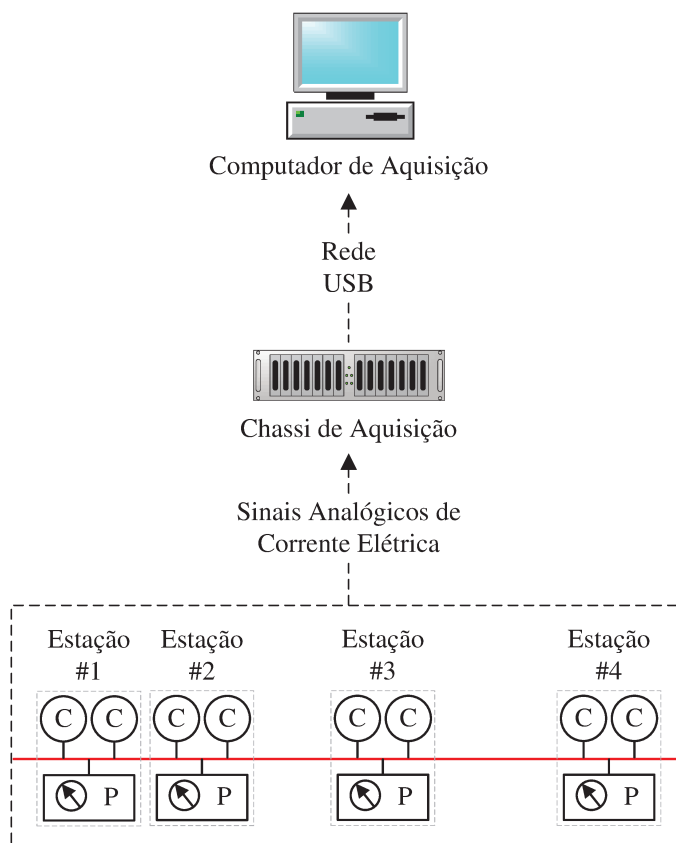


Figura 3.10. Representação esquemática do módulo de aquisição de dados.

Na aquisição e armazenamento dos dados oriundos da instrumentação da seção de teste, utilizou-se o programa computacional Adquire desenvolvido pelo grupo de pesquisa 2PFG em ambiente LabVIEW[®]. O ajuste do tempo de aquisição, frequência de amostragem, alocação de memória e parâmetros de endereçamento, além de visualização simultânea do comportamento instantâneo dos sensores de condutância e dos transdutores de pressão são efetuados no programa Adquire, conforme ilustrado na Figura 3.11. Cada coluna do arquivo resultante corresponde a um instrumento de medição e o tamanho do arquivo depende da frequência de aquisição e do tempo de amostragem.

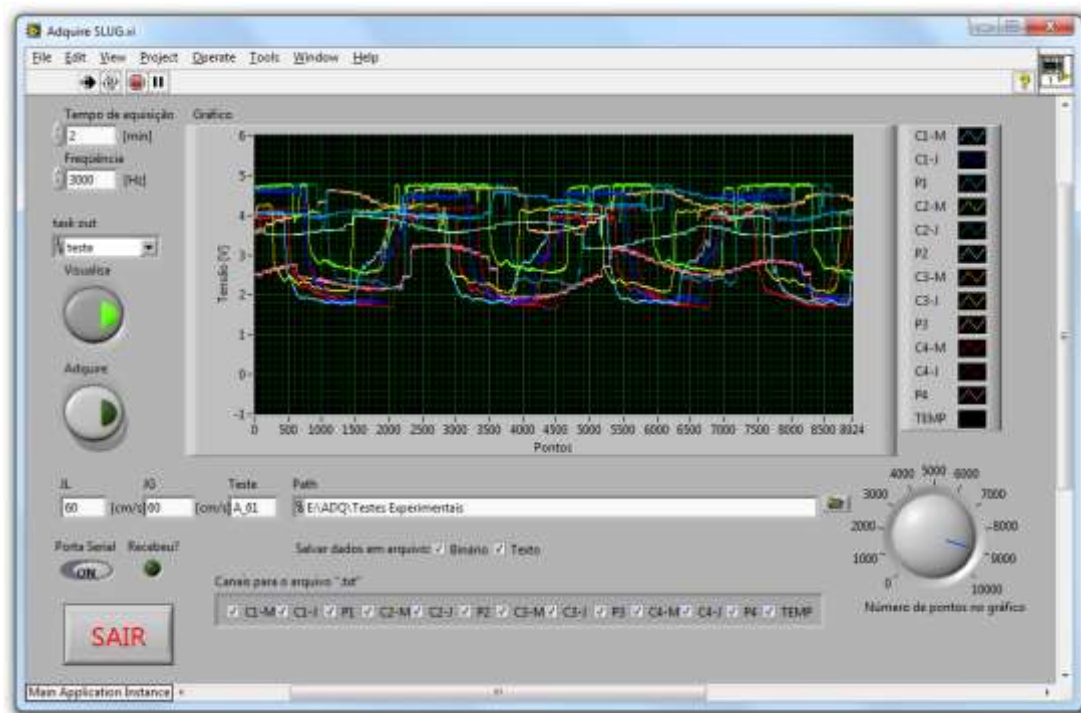


Figura 3.11. Interface gráfica do programa computacional Adquire.

3.4 Procedimento Experimental

Realizaram-se quatro testes experimentais com diferentes velocidades superficiais de gás e líquido para estudar o escoamento transiente no padrão golfadas. No primeiro teste, a vazão volumétrica da fase líquida manteve-se constante, enquanto diminuiu-se abruptamente a vazão volumétrica da fase gasosa. No segundo teste, a vazão volumétrica da fase líquida permaneceu constante, enquanto aumentou-se subitamente a vazão volumétrica da fase gasosa. Analogamente, no terceiro teste, diminuiu-se a vazão volumétrica da fase líquida repentinamente mantendo a fase gasosa inalterada e, no quarto teste, aumentou-se a vazão volumétrica da fase líquida preservando a fase gasosa constante.

Utilizaram-se ar comprimido e água da rede de abastecimento como fluidos de teste. A massa específica da água é 998 kg/m^3 e a massa específica do ar é determinada através da equação dos gases ideais. Registrou-se a pressão atmosférica e temperatura local de cada aquisição através do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (Cepagri) localizado na Universidade Estadual de Campinas. A pressão atmosférica local média dos quatro testes é $93,7 \text{ kPa}$ e a temperatura local média manteve-se em $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

O procedimento experimental para cada aquisição consiste em impor as condições de vazão volumétrica do estado pseudo permanente inicial na entrada da linha de escoamento bifásico gás-líquido e aguardar a obtenção das condições operacionais em toda extensão da seção de teste. Uma vez que o escoamento intermitente de ar e água está livre dos efeitos de partida, inicia-se a aquisição de dados. Configura-se o contador interno do módulo de monitoramento dos fluidos de teste para acionar a válvula de fechamento rápido ou o inversor de frequência impreterivelmente 30 s após o início da aquisição de dados, alterando a vazão volumétrica das fases gasosa ou líquida e, conseqüentemente, instituindo o período transiente. O módulo de aquisição de dados continua registrando a evolução temporal da fração de vazio e da pressão nas quatro estações de medição por mais 70 s após a variação repentina ocorrer. Cada aquisição tem duração de 100 s e para cada um dos quatro testes experimentais, repetiram-se 100 vezes este procedimento.

As análises desenvolvidas no presente trabalho estão divididas em três períodos de tempo, conforme ilustrado pela Figura 3.12. A evolução temporal das velocidades superficiais de líquido e gás na entrada da seção de teste, os sinais médios da fração de vazio e os sinais médios da pressão para as quatro estações de medição correspondentes ao teste #1 estão apresentados na Figura 3.12.

O estado pseudo permanente inicial é o período compreendido entre o início da aquisição de dados e a alteração súbita da vazão volumétrica de um dos fluidos de teste, conforme mostrado na Figura 3.12. O estado pseudo permanente final é o período contido entre a estabilização da pressão e o término da aquisição de dados. O período inicial dura exatamente 30 s para os quatro testes experimentais, enquanto o período final inicia-se tipicamente em 60 s e perdura até 100 s. Por fim, o período transiente é o período compreendido entre a mudança abrupta da velocidade superficial de uma das fases e a estabilização da pressão.

Nos estados pseudo permanentes inicial e final, as velocidades superficiais nominais das fases líquida e gasosa são constantes, enquanto os parâmetros geométricos e cinemáticos do escoamento intermitente exibem uma variação típica do padrão golfadas, como descrito por Nydal *et al.* (1992). Por outro lado, o período transiente é caracterizado pela alteração temporal e espacial das propriedades discretas.

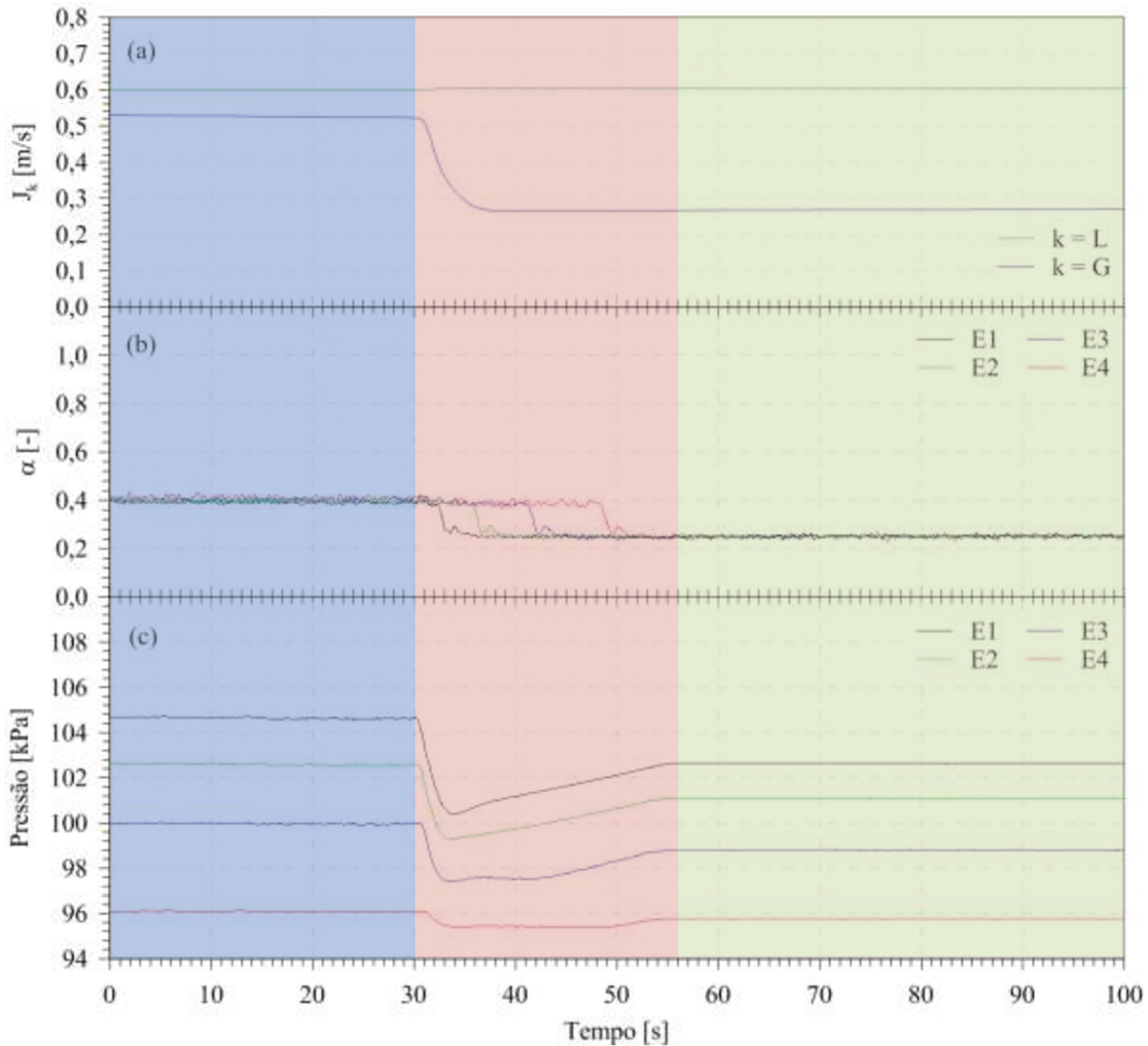


Figura 3.12. Definição dos períodos inicial, transiente e final.

A Tabela 3.1 apresenta as velocidades superficiais nominais das fases líquida e gasosa para os estados pseudo permanentes inicial e final referentes aos quatro testes experimentais conduzidos. Nos testes #1 e #2, percebem-se as alterações simétricas de $\pm 0,30$ m/s na velocidade superficial nominal de ar em relação ao estado inicial, enquanto a velocidade superficial nominal de água permanece constante. Nos testes #3 e #4, observam-se as mudanças simétricas de $\pm 0,30$ m/s na velocidade superficial nominal de água, ao passo que a velocidade superficial nominal de ar mantém-se inalterada.

O teste #1 consiste no bloqueio da válvula esfera de fechamento rápido e na diminuição da velocidade superficial de ar, ao mesmo tempo em que a velocidade superficial de água permanece inalterada. O teste #1 caracteriza-se por uma onda de expansão, uma vez que a velocidade superficial de mistura do estado final é reduzida em relação ao estado inicial. O teste #2 compreende a abertura da válvula esfera de fechamento rápido e a elevação da

velocidade superficial de ar, enquanto a velocidade superficial de água mantém-se praticamente constante. O teste #2 define-se por uma onda de compressão, visto que a velocidade superficial de mistura é aumentada.

O teste #3 corresponde à diminuição da rotação da bomba centrífuga de alimentação através do inversor de frequência e à redução da velocidade superficial de água, ao passo que a velocidade superficial da fase gasosa permanece estável. O teste #3 caracteriza-se por uma onda de expansão devido à diminuição da velocidade superficial de mistura. O teste #4 refere-se ao aumento da rotação da bomba centrífuga de alimentação e à elevação da velocidade superficial de água, enquanto a velocidade superficial de ar mantém-se inalterada. O teste #4 define-se por uma onda de compressão, já que a velocidade superficial de mistura é incrementada em relação ao estado inicial.

Tabela 3.1. Velocidades superficiais nominais das fases líquida e gasosa dos estados inicial e final para os quatro testes experimentais.

	Teste #1		Teste #2		Teste #3		Teste #4	
	J_L^n [m/s]	J_G^n [m/s]	J_L^n [m/s]	J_G^n [m/s]	J_L^n [m/s]	J_G^n [m/s]	J_L^n [m/s]	J_G^n [m/s]
Estado Inicial	0,60	0,60	0,60	0,30	0,60	0,60	0,30	0,60
Estado Final	0,60	0,30	0,60	0,60	0,30	0,60	0,60	0,60

4 PROCESSAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DE INCERTEZAS

Os procedimentos para determinação da velocidade de propagação da onda de fração de vazio e da onda de pressão no escoamento transiente horizontal no padrão golfadas são apresentados na primeira seção deste capítulo. A segunda seção expõe o processamento de dados para caracterização dos parâmetros geométricos e cinemáticos. Por fim, a terceira seção descreve a análise de incertezas referentes às velocidades da onda de fração de vazio e da onda de pressão, bem como a análise de incertezas das propriedades contínuas e discretas do escoamento intermitente.

4.1 Determinação da Velocidade da Onda de Fração de Vazio e da Onda de Pressão

Na determinação das velocidades da onda de fração de vazio e da onda de pressão, faz-se necessário empregar o processo de média de conjunto para filtrar o comportamento intermitente intrínseco do escoamento no padrão golfadas devido à passagem alternada de bolhas alongadas e pistões de líquido. O processo de média de conjunto consiste na importação e filtragem das 100 aquisições para cada um dos quatro testes experimentais através do programa computacional MatLab[®].

A Figura 4.1 exemplifica o processo de média de conjunto do sinal de fração de vazio correspondente à estação de medição 2 do teste #1. Por conveniência, utilizou-se o sinal de voltagem adimensional proporcional à fração de vazio, $(1-V^*)$, nas etapas iniciais do processo de média de conjunto e a posterior transformação em fração de vazio. Portanto, as Figuras 4.1a-d apresentam valores de $(1-V^*)$ no eixo y e apenas na Figura 4.1e esses valores são convertidos em fração de vazio. As Figuras 4.1a-c mostram, respectivamente, o sinal de $(1-V^*)$ para uma única aquisição, o sinal médio de $(1-V^*)$ resultante de 10 aquisições e o sinal médio de $(1-V^*)$ resultante de 100 aquisições. Percebe-se que a definição do perfil de fração de vazio melhora com o aumento do número de aquisições, porém o sinal ainda apresenta oscilações impossibilitando a determinação apropriada da velocidade da onda de fração de vazio. Para reduzir o ruído, aplica-se uma média móvel centrada de 3001 pontos no sinal

médio de $(1-V^*)$ obtido a partir de 100 aquisições, conforme apresentado na Figura 4.1d. Finalmente, na Figura 4.1e, o sinal de $(1-V^*)$ é transformado em fração de vazio através da curva de calibração do respectivo sensor de condutância.

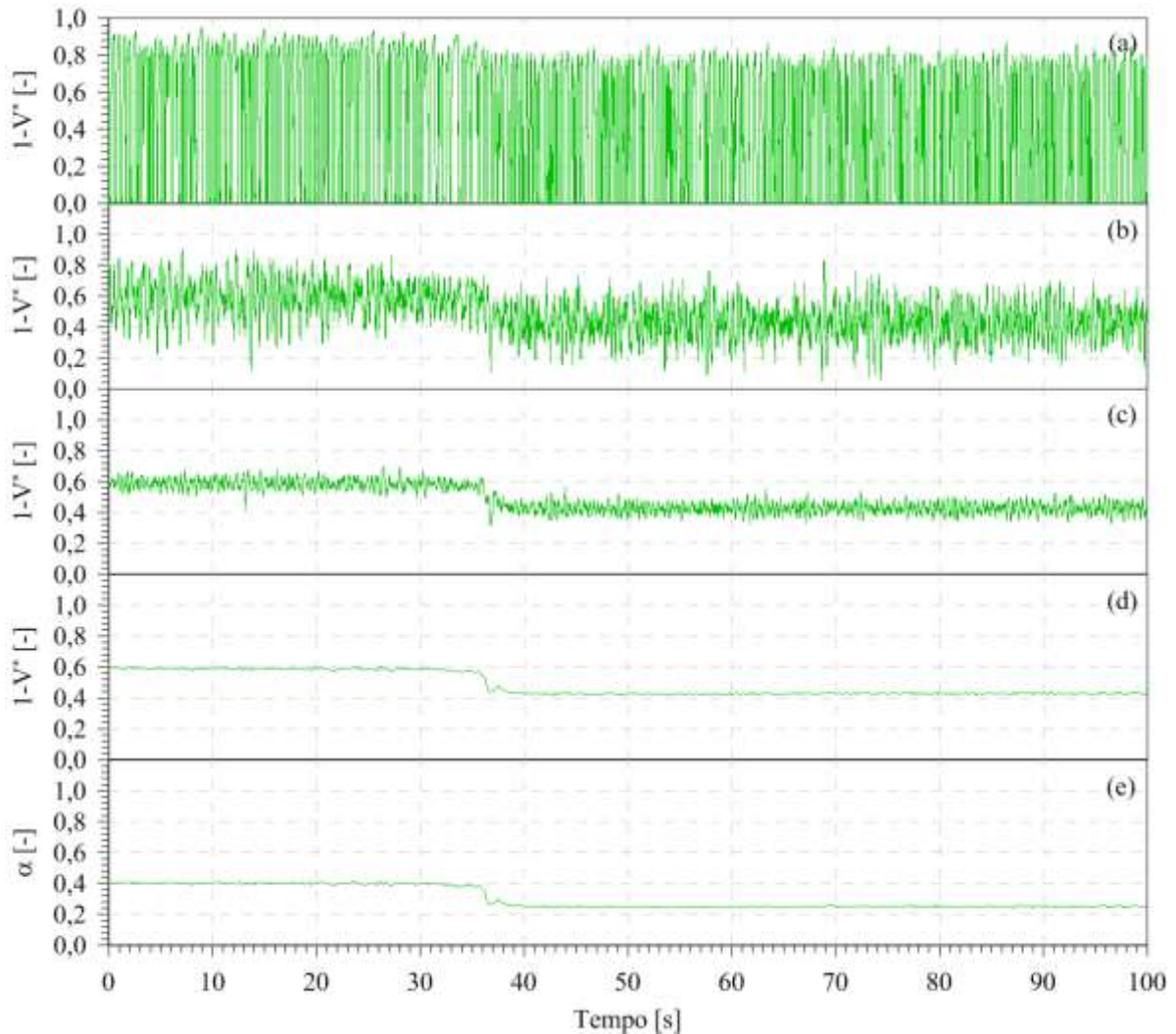


Figura 4.1. Processo de média de conjunto da fração de vazio correspondente à estação de medição 2 do teste #1. (a) Sinal de $(1-V^*)$ para 1 aquisição; (b) sinal médio de $(1-V^*)$ para 10 aquisições; (c) sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições; (d) sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições após média móvel de 3001 pontos e (e) sinal médio de 100 aquisições após média móvel centrada de 3001 pontos e conversão em fração de vazio.

Executou-se o processo de média de conjunto da pressão similarmente ao processo de média de conjunto da fração de vazio. As Figuras 4.2a-c demonstram, respectivamente, o sinal de pressão para uma única aquisição, o sinal médio de pressão para 10 aquisições e o sinal médio de pressão para 100 aquisições correspondentes à estação de medição 2 do teste #1. A Figura 4.2d exibe o sinal médio de pressão para 100 aquisições após a aplicação da média móvel centrada de 31 pontos.

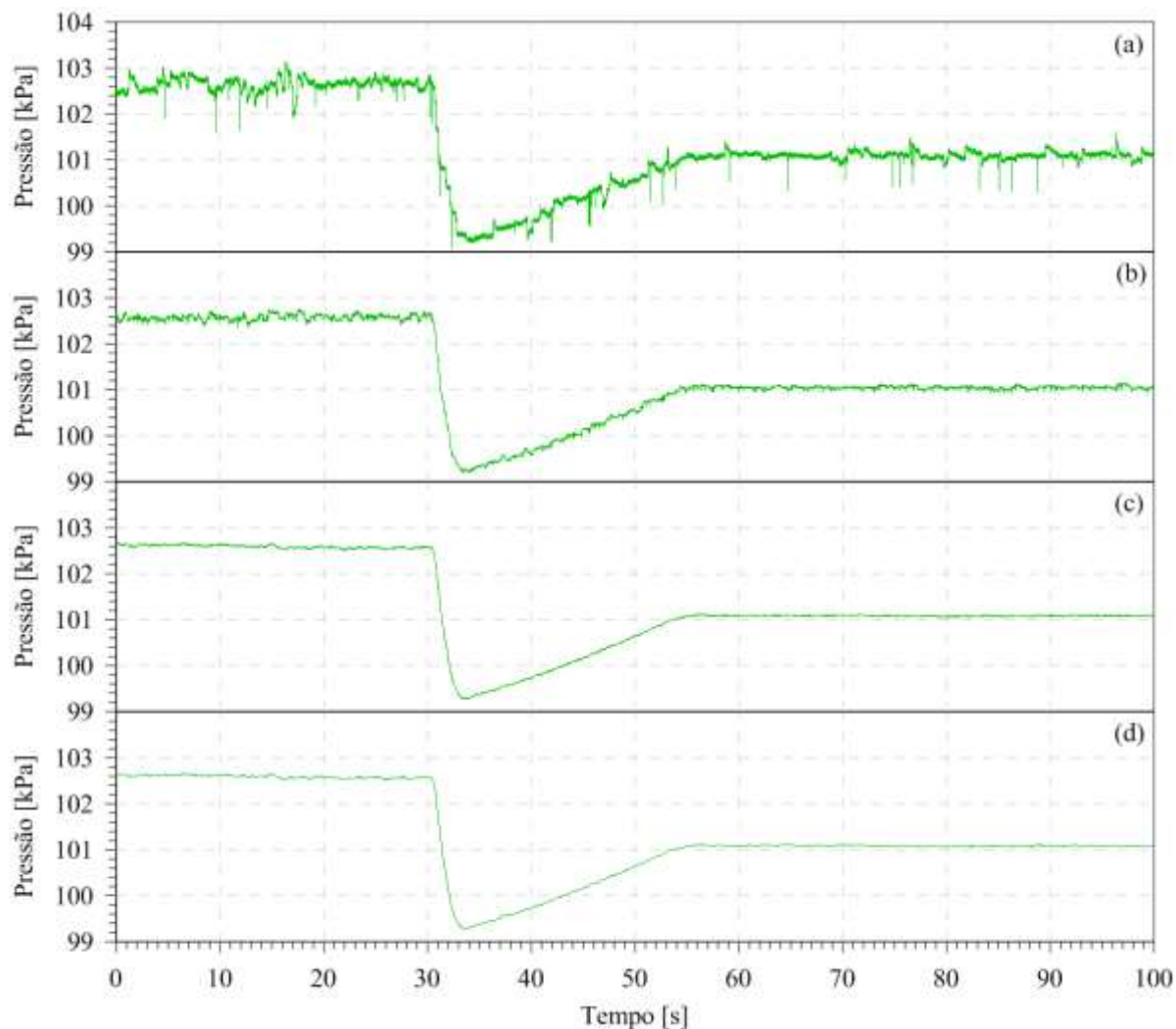


Figura 4.2. Processo de média de conjunto da pressão correspondente à estação de medição 2 do teste #1. **(a)** Sinal de pressão para 1 aquisição; **(b)** sinal médio de pressão para 10 aquisições; **(c)** sinal médio de pressão para 100 aquisições e **(d)** sinal médio de pressão para 100 aquisições após média móvel centrada de 31 pontos.

Como os perfis de fração de vazio e de pressão obtidos para os testes experimentais com variação brusca da fase líquida são significativamente diferentes dos perfis alcançados para as condições operacionais com mudança súbita da fase gasosa, decidiu-se apresentar também o processo de média de conjunto referente ao teste #4.

Analogamente à Figura 4.1, a Figura 4.3 expõe o processo de média de conjunto do sinal de fração de vazio correspondente à estação de medição 2 do teste #4. O sinal de $(1-V^*)$ para uma única aquisição, o sinal médio de $(1-V^*)$ para 10 aquisições e o sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.3a-c. A Figura 4.3d exibe o sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições após aplicação da média móvel centrada de 3001 pontos. Por fim, na Figura 4.3e, o sinal de $(1-V^*)$ é convertido em fração de vazio através da curva de calibração do sensor de condutância.

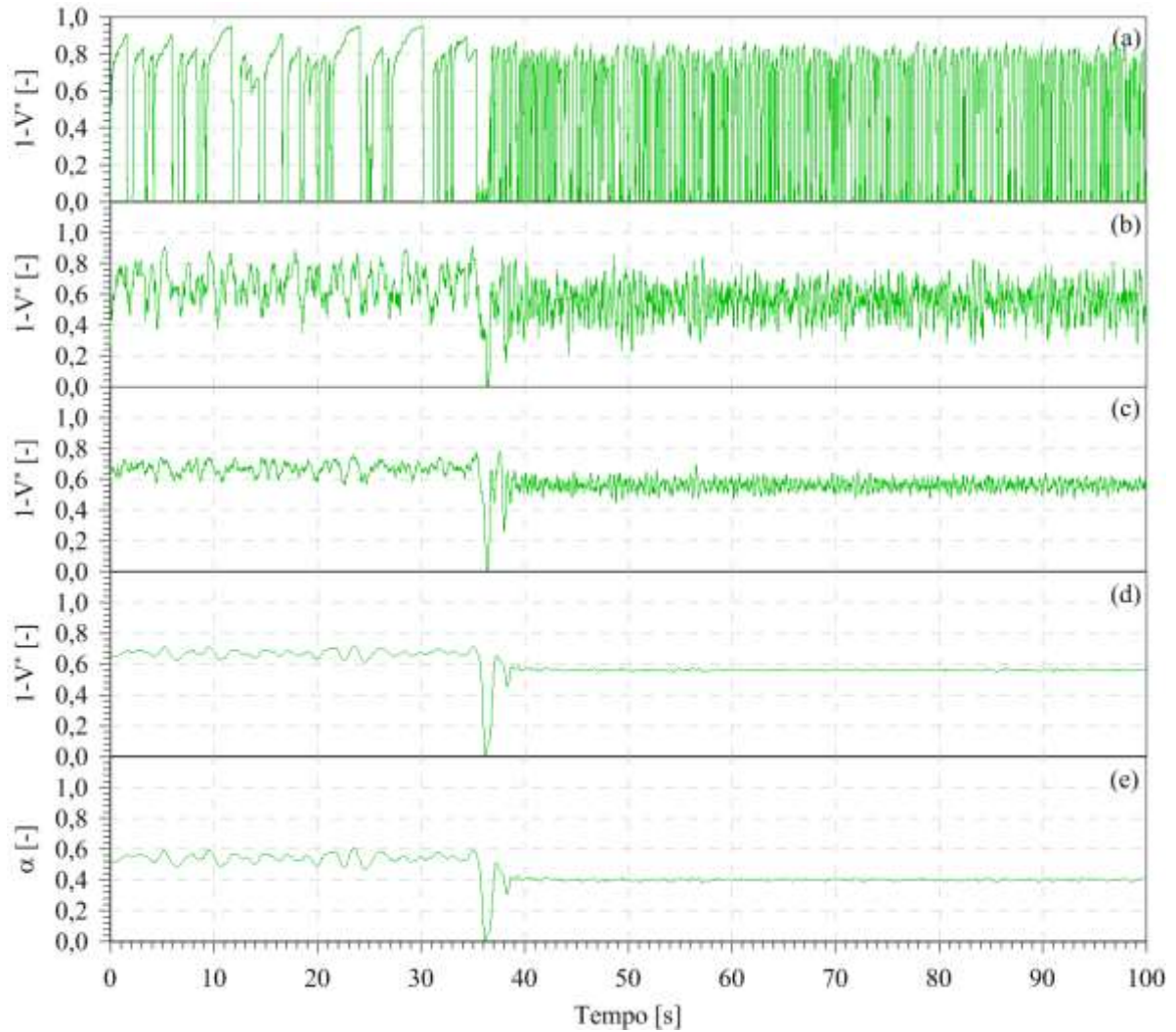


Figura 4.3. Processo de média de conjunto da fração de vazio correspondente à estação de medição 2 do teste #4. **(a)** Sinal de $(1-V^*)$ para 1 aquisição, **(b)** sinal médio de $(1-V^*)$ para 10 aquisições; **(c)** sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições; **(d)** sinal médio de $(1-V^*)$ para 100 aquisições após média móvel de 3001 pontos e **(e)** sinal médio de 100 aquisições após média móvel centrada de 3001 pontos e conversão em fração de vazio.

O processo de média de conjunto da pressão referente à estação de medição 2 do teste #4 está exposto na Figura 4.4. O sinal de pressão de uma única aquisição, o sinal médio de 10 aquisições e o sinal médio de 100 aquisições estão explicitados, respectivamente, nas Figuras 4.4a-c. Por fim, a Figura 4.4d apresenta o sinal médio de pressão de 100 aquisições após a aplicação da média móvel centrada de 31 pontos.

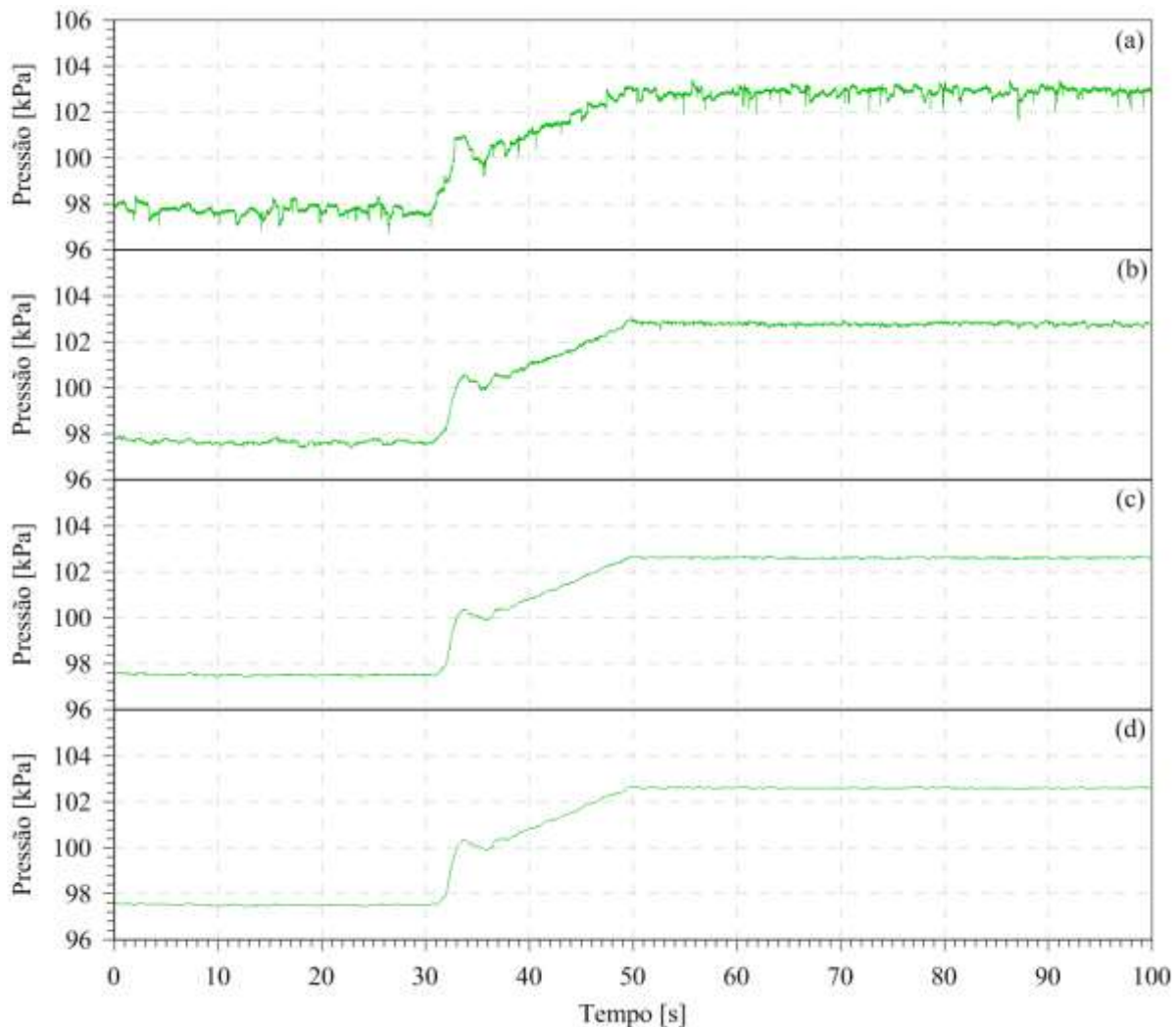


Figura 4.4. Processo de média de conjunto da pressão correspondente à estação de medição 2 do teste #4. **(a)** Sinal de pressão para 1 aquisição; **(b)** sinal médio de pressão para 10 aquisições; **(c)** sinal médio de pressão para 100 aquisições e **(d)** sinal médio de pressão para 100 aquisições após média móvel centrada de 31 pontos.

Os sinais médios de fração de vazio após a aplicação da média móvel centrada de 3001 pontos, similares às Figuras 4.1 e 4.3, e os sinais médios de pressão após a aplicação da média móvel centrada de 31 pontos, similares às Figuras 4.2 e 4.4, para as quatro estações de medição correspondentes a cada um dos quatro testes experimentais estão plotados simultaneamente no Capítulo 5. Os sinais médios de fração de vazio das quatro estações de medição permitem a estimativa da velocidade de propagação da onda de fração de vazio através da relação entre o espaçamento de duas estações de medição e o intervalo de tempo necessário para realizar esse percurso. De maneira semelhante, os sinais médios de pressão das quatro estações de medições possibilitam a determinação da velocidade de propagação da onda de pressão através da relação entre a distância de duas estações de medição e o intervalo de tempo gasto no deslocamento.

No cálculo das velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão, consideraram-se as 3 combinações entre estações de medição vizinhas, estações 1 e 2 (E1 - E2), estações 2 e 3 (E2 - E3) e estações 3 e 4 (E3 - E4), além das outras 3 combinações possíveis, estações 1 e 3 (E1 - E3), estações 2 e 4 (E2 - E4) e estações 1 e 4 (E1 - E4). As distâncias entre os transdutores de pressão e os sensores de condutância das estações 1 e 2, estações 2 e 3, estações 3 e 4, estações 1 e 3, estações 2 e 4 e estações 1 e 4 correspondem, respectivamente, a 230 D, 352 D, 439 D, 511 D, 588 D e 710 D.

O intervalo de tempo necessário para as ondas de fração de vazio e de pressão percorrerem a distância entre duas estações de medição é a diferença entre os instantes iniciais que a onda atinge as estações de medição correspondentes.

O critério de determinação do instante inicial da onda de fração de vazio e da onda de pressão é exemplificado, respectivamente, através dos sinais de fração de vazio e pressão referentes à estação de medição 3 do teste #1, na qual os valores de fração de vazio e de pressão depois do período transiente são menores que os valores do estado inicial. Para esse caso, encontram-se os valores mínimos de fração de vazio e de pressão antes da variação brusca causada pelo transiente no eixo das ordenadas, desloca-se horizontalmente até a queda e registram-se os instantes de tempo correspondentes no eixo das abscissas, conforme representado esquematicamente na Figura 4.5.

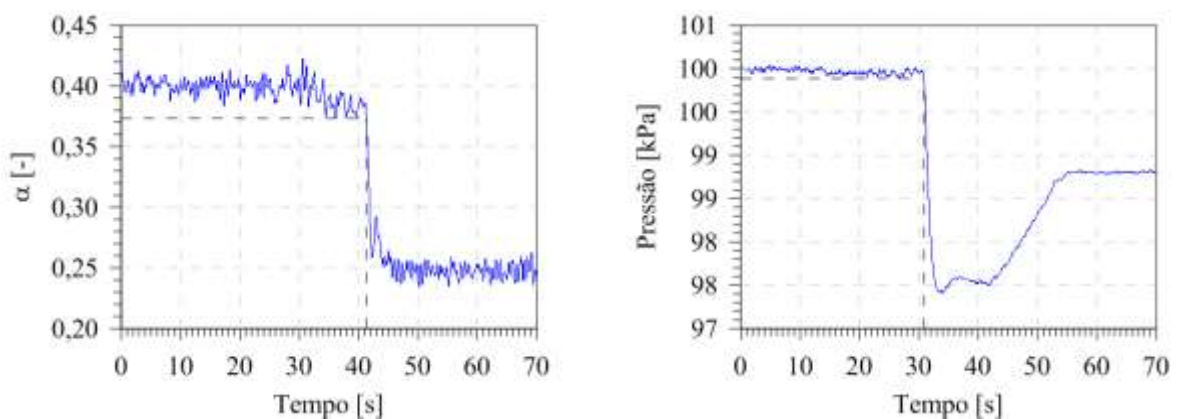


Figura 4.5. Representação esquemática do critério de determinação do instante inicial para (a) a onda de fração de vazio e (b) a onda de pressão referentes à estação de medição 3 do teste #1.

Se o estado final apresentar valores de fração de vazio e de pressão maiores que os valores do estado inicial, como no teste #2, deve-se localizar os valores máximos na série temporal de fração de vazio e de pressão antes da variação súbita provocada pelo período transiente no eixo das ordenadas, deslocar-se horizontalmente até o salto e obter os instantes de tempo correspondentes no eixo das abscissas.

O critério de determinação do instante inicial também pode ser aplicado separadamente. No teste #3, o perfil de fração de vazio apresenta maiores valores no estado final, enquanto a pressão diminui devido à mudança súbita da vazão volumétrica da fase líquida, conforme explicitado na Figura 4.6. Nesse caso, para estimativa da velocidade da onda de fração de vazio, faz-se necessário encontrar o valor máximo na evolução temporal da fração de vazio antes da variação repentina causada pelo período transiente, mover-se horizontalmente até o salto e encontrar o instante de tempo correspondente. Complementarmente, para cálculo da velocidade da onda de pressão, faz-se necessário localizar o valor mínimo na série temporal da pressão antes da variação abrupta, mover-se horizontalmente até a queda do período transiente e registrar o respectivo instante de tempo

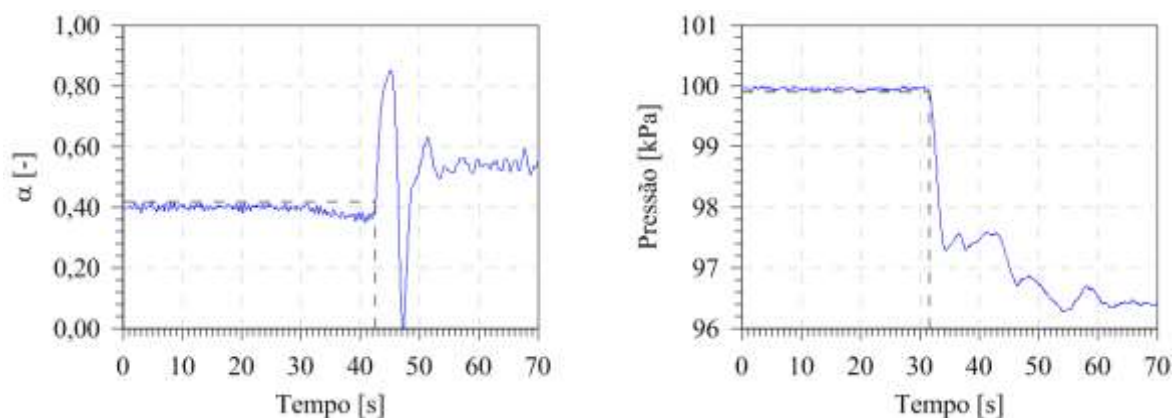


Figura 4.6. Representação esquemática do critério de determinação do instante inicial para (a) a onda de fração de vazio e (b) a onda de pressão referentes à estação de medição 3 do teste #3.

Embora o processo de média de conjunto com 100 aquisições aliado à média móvel seja aparentemente satisfatório, analisaram-se a sensibilidade da velocidade de propagação da onda de fração de vazio e da onda de pressão em relação ao número de pontos do filtro de média móvel centrada e ao tamanho da amostragem com base nos dados do teste #1.

A primeira análise de sensibilidade refere-se ao número de pontos utilizados na média móvel. Avaliou-se a velocidade da onda de fração de vazio empregando uma amostra com 100 aquisições e média móvel centrada de 501, 1501, 3001, 4501 e 6001 pontos. Similarmente, investigou-se a velocidade da onda de pressão aplicando média móvel centrada de 5, 15, 31, 45 e 61 pontos e 100 aquisições no processo de média de conjunto.

As velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão obtidas para diferentes números de pontos da média móvel e combinações de estações de medição estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 4.1 e 4.2. Tomaram-se como referência as velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão calculadas, respectivamente, com 3001

e 31 pontos. Examinaram-se as velocidades de propagação das ondas com diferentes médias móveis em relação aos valores de referência através da raiz do valor quadrático médio, também conhecido como RMS, do inglês *root mean square*. Para a velocidade da onda de fração de vazio, encontraram-se RMS de 0,01 m/s, 0,01 m/s, 0,02 m/s e 0,02 m/s para, respectivamente, 501, 1501, 4501 e 6001 pontos. Dessa forma, justifica-se o uso da média móvel centrada de 3001 pontos para a velocidade da onda de fração de vazio, dado que o RMS máximo é de 0,02 m/s para médias móveis variando de 501 até 6001 pontos. Analogamente, para a velocidade da onda de pressão, obtiveram-se RMS de 0,20 m/s, 0,12 m/s, 0,15 m/s e 0,19 m/s para, respectivamente, 5, 15, 45 e 61 pontos. Portanto, fundamenta-se a aplicação da média móvel centrada de 31 pontos para a velocidade da onda de pressão baseado no RMS máximo de 0,2 m/s para médias móveis compreendidas entre 5 e 61 pontos.

Tabela 4.1. Sensibilidade da velocidade da onda de fração de vazio (c_α) para médias móveis centradas com diferentes números de pontos e processo de média de conjunto com 100 aquisições.

		Velocidade da Onda de Fração de Vazio (c_α)				
		[m/s]				
		501	1501	3001	4501	6001
Estações de Medição	E1 - E2	1,16	1,16	1,17	1,14	1,15
	E2 - E3	1,15	1,14	1,16	1,13	1,13
	E3 - E4	1,17	1,16	1,16	1,16	1,16
	E1 - E3	1,15	1,15	1,16	1,13	1,14
	E2 - E4	1,16	1,15	1,16	1,14	1,15
	E1 - E4	1,16	1,15	1,16	1,14	1,15
RMS		0,01	0,01	-	0,02	0,02

Tabela 4.2. Sensibilidade da velocidade da onda de pressão (c_p) para médias móveis centradas com diferentes números de pontos e processo de média de conjunto com 100 aquisições.

		Velocidade da Onda de Pressão (c_p)				
		[m/s]				
		5	15	31	45	61
Estações de Medição	E1 - E2	23,8	24,0	24,1	24,3	24,3
	E2 - E3	22,4	22,2	22,0	21,8	21,7
	E3 - E4	23,5	23,5	23,5	23,6	23,7
	E1 - E3	22,9	22,9	22,8	22,7	22,6
	E2 - E4	23,0	22,9	22,8	22,8	22,8
	E1 - E4	23,2	23,1	23,1	23,1	23,1
RMS		0,2	0,1	-	0,1	0,2

A segunda análise de sensibilidade refere-se ao tamanho da amostragem. Investigou-se a velocidade da onda de fração de vazio com média móvel centrada de 3001 pontos e a velocidade da onda de pressão com média móvel centrada de 31 pontos, enquanto empregaram-se médias de conjunto com 10, 20, 50 e 100 aquisições.

A Tabela 4.3 exibe as velocidades da onda de fração de vazio obtidas com média móvel centrada de 3001 pontos para os quatro tamanhos de amostragem estudados. Analogamente, a Tabela 4.4 revela as velocidades da onda de pressão alcançadas com média móvel centrada de 31 pontos para os diferentes números de aquisições. Adotaram-se como valores de referência, as velocidades de propagação das ondas calculadas com 100 aquisições e avaliou-se novamente a diferença entre os diversos cenários analisados e os valores de referência correspondentes através da raiz do valor quadrático médio. Para a velocidade da onda de fração de vazio, encontraram-se RMS de 0,015 m/s, 0,012 m/s e 0,011 m/s, com, respectivamente, 10, 20 e 50 aquisições, correspondendo às variações menores que 1% em relação ao valor referencial. Similarmente, para a velocidade da onda de pressão, alcançaram-se RMS de 2,5 m/s para 10 aquisições, 2,2 m/s para 20 aquisições e 1,3 m/s para 50 aquisições, correspondendo, respectivamente, às variações de 12%, 9% e 5% em relação à velocidade de referência.

Tabela 4.3. Sensibilidade da velocidade da onda de fração de vazio (c_a) para média móvel centrada de 3001 pontos e diferentes tamanhos de amostragem.

		Velocidade da Onda de Fração de Vazio (c_a) [m/s]			
		10	20	50	100
Estações de Medição	E1 - E2	1,15	1,16	1,15	1,17
	E2 - E3	1,14	1,14	1,14	1,16
	E3 - E4	1,17	1,15	1,16	1,16
	E1 - E3	1,14	1,15	1,15	1,16
	E2 - E4	1,16	1,15	1,15	1,16
	E1 - E4	1,15	1,15	1,15	1,16
RMS		0,01	0,01	0,01	-

Tabela 4.4. Sensibilidade da velocidade da onda de pressão (c_p) para média móvel centrada de 31 pontos e diferentes tamanhos de amostragem.

		Velocidade da Onda de Pressão (c_p) [m/s]			
		10	20	50	100
Estações de Medição	E1 - E2	21,0	21,3	22,9	24,1
	E2 - E3	23,4	23,6	24,2	22,0
	E3 - E4	20,7	25,5	23,1	23,5
	E1 - E3	22,4	24,8	23,8	22,8
	E2 - E4	19,8	25,5	24,3	22,8
	E1 - E4	20,0	24,9	23,5	23,1
RMS		2,5	2,2	1,3	-

Apesar do sinal de pressão apresentar perfis bem definidos para uma única aquisição, verificou-se que a maior diferença entre os valores de referência e as diversas configurações analisadas ocorreu na velocidade da onda de pressão. Por outro lado, as raízes dos valores quadráticos médios e as variações para a velocidade da onda de fração de vazio são significativamente menores que as diferenças encontradas para a velocidade da onda de pressão, ainda que a tendência da fração de vazio seja dificilmente tangível a partir de uma única aquisição.

Baseado nos resultados das análises de sensibilidade, julgou-se aceitável a aplicação da média móvel centrada de 3001 pontos para a estimativa da velocidade da onda de fração de vazio e de 31 pontos para o cálculo da velocidade da onda de pressão, bem como o uso da média de conjunto com 100 aquisições para os quatro testes experimentais.

4.2 Determinação dos Parâmetros Geométricos e Cinemáticos

Na estimativa dos parâmetros geométricos e cinemáticos do escoamento intermitente, utilizou-se o programa computacional Slug desenvolvido pelo grupo de pesquisa 2PFG em ambiente LabVIEW[®], cuja interface gráfica está exposta na Figura 4.7. O programa computacional Slug executa a leitura do arquivo previamente gerado e a identificação das propriedades geométricas e cinemáticas do escoamento por meio de algoritmos lógicos. Os dados contidos no arquivo são convertidos em valores proporcionais à fração de vazio e pressão através das respectivas equações de calibração. Posteriormente, calculam-se a

velocidade de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento da bolha alongada, o comprimento do pistão de líquido, a frequência de passagem de golfadas, o fator de intermitência e a taxa média de coalescência, bem como a distribuição estatística dessas propriedades. O algoritmo computacional empregado na identificação das bolhas alongadas e dos pistões de líquido está descrito detalhadamente em Duarte (2007).

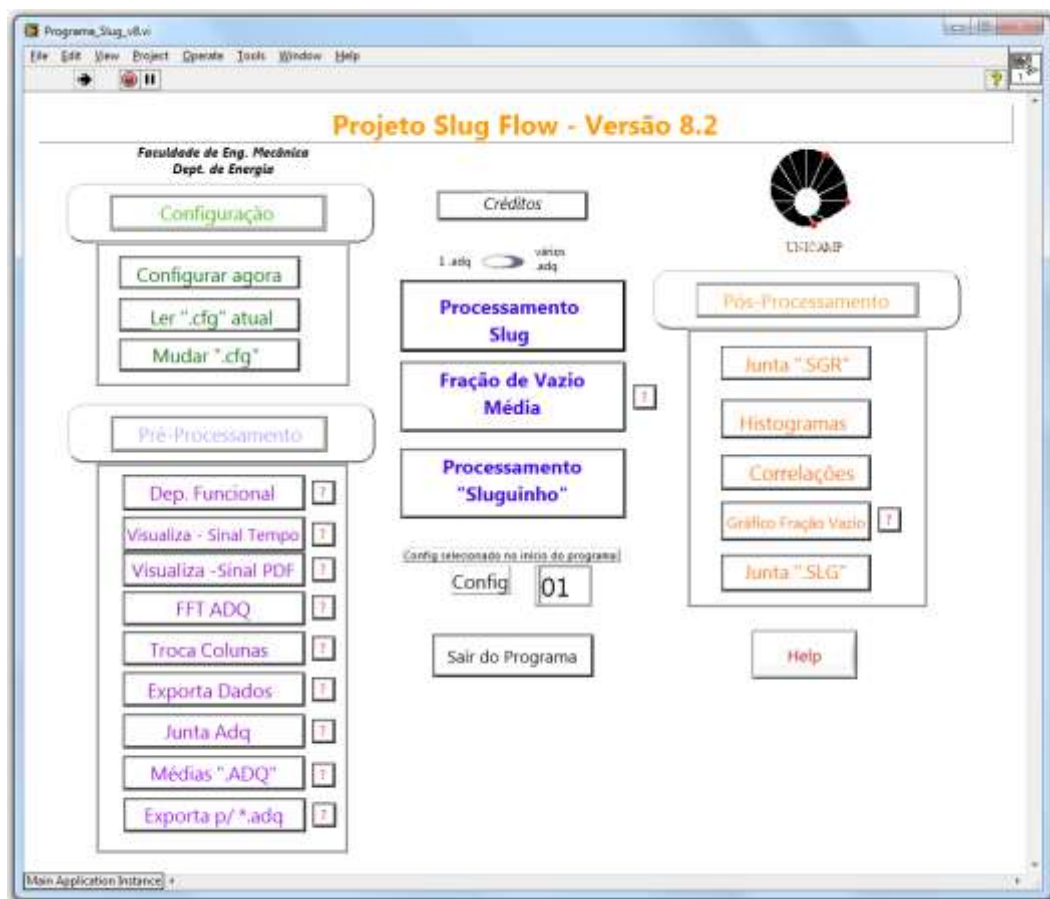


Figura 4.7. Interface gráfica do programa computacional Slug.

Conforme descreve minuciosamente Duarte (2007), o programa Slug é composto por quatro módulos, sendo eles: Configuração, Pré-Processamento, Processamento Principal e Pós-Processamento. A inserção das equações de calibração dos sensores, posicionamento das estações de medição, pressão atmosférica local e propriedades dos fluidos são efetuadas através do módulo de Configuração.

O módulo de Pré-Processamento é utilizado para visualização do sinal adquirido e estimativa do fator de corte adequado. O fator de corte é um valor de referência empregado na identificação das estruturas do escoamento. Interpretam-se os valores de voltagem superiores ao fator de corte como pistões de líquido e os valores de voltagens inferiores são traduzidos

como bolhas alongadas. Apesar de não existir uma metodologia objetiva para definir o fator de corte, a maioria dos pesquisadores propõe buscar uma faixa de valores na qual o número de bolhas permanece constante, enquanto outros pesquisadores simplesmente adotam o fator de corte igual a 0,5. No presente trabalho, examinaram-se individualmente as quatro estações de medição de cada aquisição para encontrar a região na qual a ocorrência de bolhas independe do fator de corte aplicado.

Apresentam-se dois gráficos da dependência funcional entre o fator de corte e o número de ocorrência de bolhas na Figura 4.8. O gráfico superior e inferior referem-se, respectivamente, ao sensor de condutância à montante e à jusante da estação de medição 1 para o teste #2. Observa-se comportamento similar nos dois sensores analisados e a existência de uma região de fatores de corte entre 0,4 e 0,8 na qual a quantidade de bolhas capturadas mantém-se praticamente inalterada, sugerindo que a escolha mais apropriada está contida nesta faixa de valores.

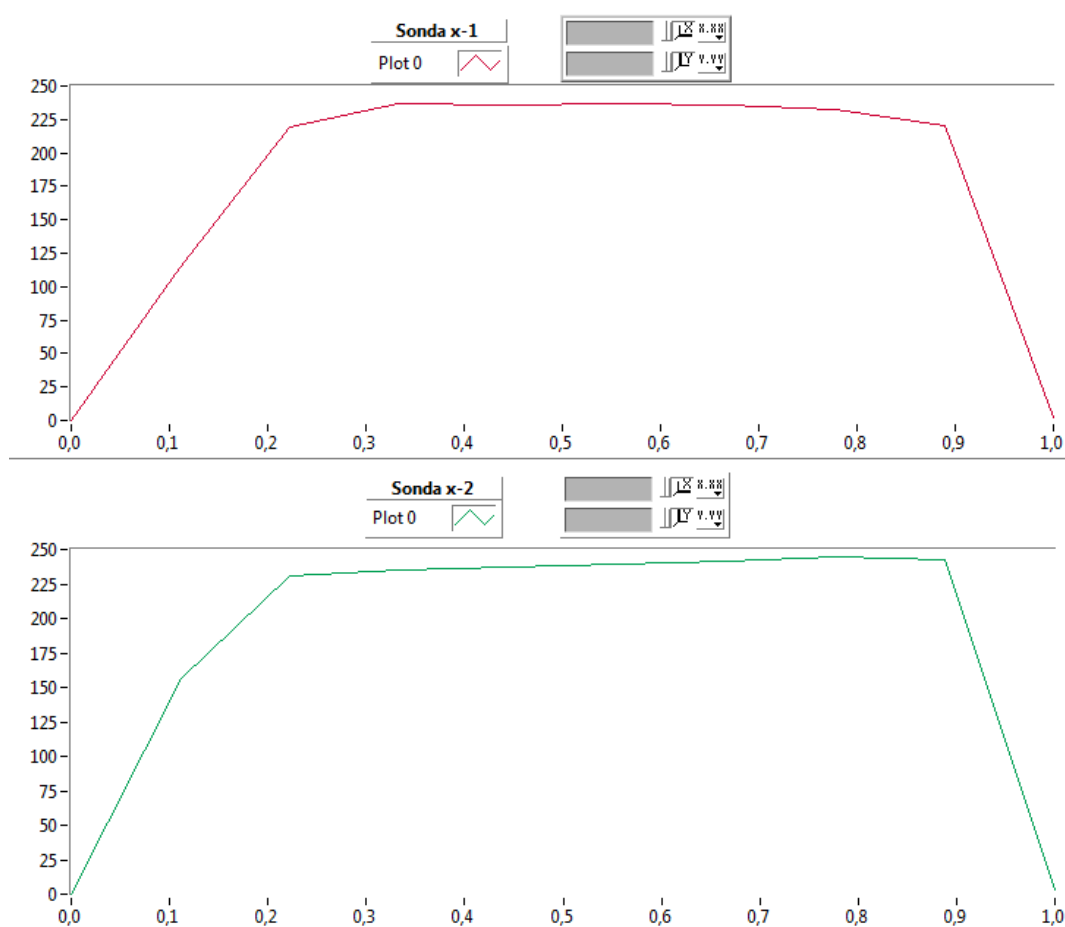


Figura 4.8. Dependência funcional entre o fator de corte e o número de ocorrência de bolhas da estação de medição 1 para o teste #2.

A Figura 4.9 demonstra graficamente a aplicação do fator de corte nos sinais originados pelos sensores de condutância da estação de medição 1 para o teste #2. O gráfico superior refere-se ao sinal adquirido pelo sensor de condutância à montante, enquanto o sinal correspondente ao sensor de condutância à jusante está exposto no gráfico inferior. Os sinais de voltagem adimensional normalizada obtidos pelos sensores estão apresentados em azul e os sinais após a aplicação do fator de corte de 0,7 estão expostos em vermelho. A geração da onda quadrada indica os tempos de contato das fases gasosa e líquida com a haste metálica dos sensores de condutância. A onda quadrada com valor igual a 0 indica que a haste metálica está em contato com a fase gasosa, enquanto que o valor igual a 1 sinaliza que a haste metálica está em contato com a fase líquida.

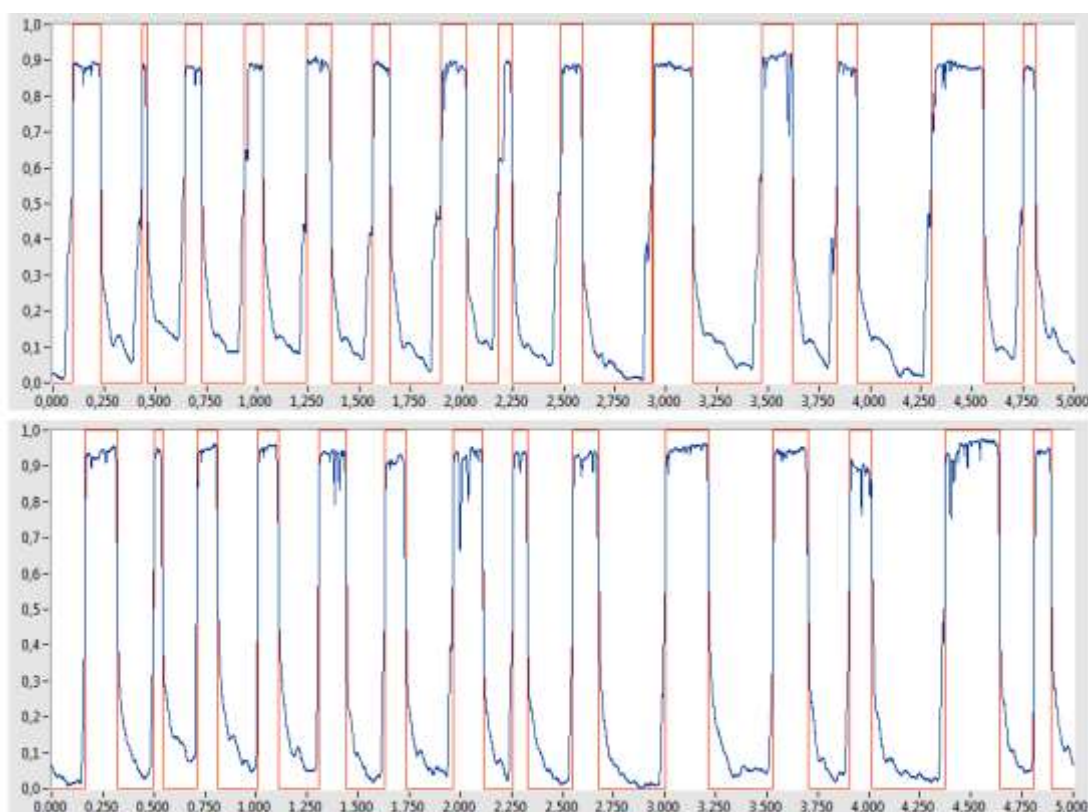


Figura 4.9. Sinais de voltagem normalizada e ondas quadradas dos sensores de condutância da estação de medição 1 para o teste #2.

O módulo de Processamento Principal executa o tratamento dos dados registrados pelo programa Adquire para obtenção das características geométricas e cinemáticas. Os sinais de voltagens obtidos pelos sensores de condutância são normalizados entre 0 e 1 através da Equação 4.1 e, em seguida, processados por algoritmos lógicos para determinação das velocidades e comprimentos das estruturas constituintes do escoamento intermitente:

$$V^* = \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}, \quad (4.1)$$

onde V^* é o sinal de voltagem adimensional normalizado entre 0 e 1, V é o sinal analógico de voltagem instantânea do sensor, V_{\min} é a voltagem obtida quando a haste metálica do sensor de condutância está em contato unicamente com a fase gasosa e V_{\max} é voltagem registrada quando a seção de teste encontra-se completamente preenchida de líquido. A fração de vazio é proporcional à $(1-V^*)$ e a dependência exata é determinada através da curva de calibração dos sensores de condutância baseada na hipótese de interface gás-líquido plana.

O módulo de Processamento Principal é responsável pela identificação da ocorrência das fases gasosa e líquida com auxílio do fator de corte escolhido no módulo de Pré-Processamento. O fator de corte é uma função lógica que converte o sinal de voltagem adimensional normalizado em uma onda quadrada através do critério expresso na Equação 4.2:

$$\begin{aligned} \text{Se } V^* \geq FC, \text{ então } V^* &= 1 \rightarrow \text{ocorrência da fase líquida,} \\ \text{Se } V^* < FC, \text{ então } V^* &= 0 \rightarrow \text{ocorrência da fase gasosa,} \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde FC é o fator de corte e varia entre 0 e 1.

A Figura 4.10 demonstra a representação esquemática dos sinais de voltagem adimensional normalizada de dois sensores de condutância de determinada estação de medição. O sinal superior refere-se ao sensor à montante e o sinal inferior corresponde ao sensor à jusante. Nota-se a ocorrência de duas unidades ou conjuntos pistão - bolha (cpb) no sensor de condutância à montante, sendo que a unidade inicia-se no nariz do pistão de líquido e termina na cauda da bolha de gás. A notação $i = 1$ ou 2 corresponde, respectivamente, ao sensor à montante e à jusante de determinada estação de medição. O índice j identifica a unidade, onde $1 \leq j \leq m$ e m representa o número total de unidades em determinada aquisição experimental. O tempo de residência do pistão de líquido da unidade j em contato com a haste metálica do sensor i é expresso por ts_{ij} e o tempo de residência da bolha alongada da unidade j em contato com a haste metálica do sensor i é dado por tb_{ij} . O intervalo de tempo entre o início da aquisição e o surgimento do pistão de líquido da unidade j no sensor i é simbolizado por TS_{ij} , enquanto TB_{ij} é o intervalo de tempo entre o início da aquisição e o aparecimento da bolha alongada da unidade j no sensor i .

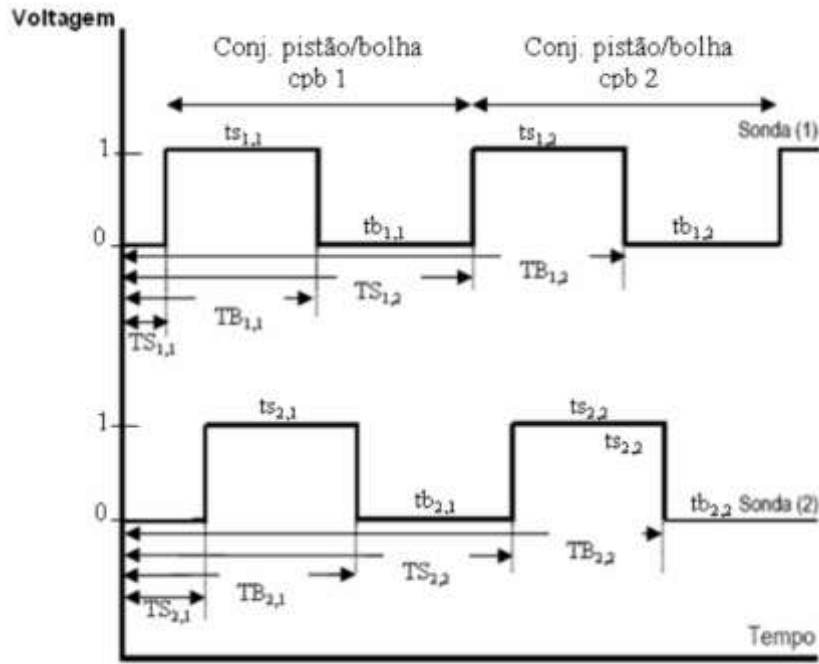


Figura 4.10. Sinais lógicos de dois sensores de condutância de determinada estação de medição. Fonte: Duarte, 2007.

O tempo gasto pelo nariz da j -ésima bolha alongada para percorrer a distância correspondente ao espaçamento entre os dois sensores de uma estação de medição é expressa pela Equação 4.3:

$$\Delta TB_j = TB_{i+1,j} - TB_{i,j}. \quad (4.3)$$

A velocidade de translação do nariz da j -ésima bolha alongada é calculada pela relação entre o espaçamento das hastes metálicas dos dois sensores de condutância de determinada estação de medição e o intervalo de tempo necessário para o nariz da bolha alongada mover-se do sensor à montante até o sensor à jusante, conforme mostrado na Equação 4.4:

$$u_{Tj} = \frac{S}{\Delta TB_j}, \quad (4.4)$$

onde S é a distância entre a haste metálica do sensor à montante e a haste metálica do sensor à jusante de determinada estação de medição.

O comprimento da j -ésima bolha alongada é estimado pela multiplicação da velocidade de translação do nariz da j -ésima bolha alongada e do tempo de residência da j -ésima bolha alongada em contato com a haste metálica do sensor à montante, consoante à Equação 4.5:

$$L_{Bj} = u_{Tj} tb_{1,j}, \quad (4.5)$$

enquanto o comprimento do j-ésimo pistão de líquido é obtido pela multiplicação da velocidade de translação do nariz da j-ésima bolha alongada e do tempo de residência do j-ésimo pistão de líquido em contato com a haste metálica do sensor à montante, em concordância com a Equação 4.6:

$$L_{sj} = u_{Tj} t_{s1,j} . \quad (4.6)$$

A frequência de passagem da j-ésima unidade é determinada pelo inverso do período da j-ésima unidade, sendo o período da unidade dado pela soma do tempo de residência da bolha alongada e do pistão de líquido, conforme exposto na Equação 4.7:

$$f_j = \frac{1}{tu_{i,j}} , \quad (4.7)$$

onde $tu_{i,j}$ é o tempo de residência da unidade j no sensor i calculado por $tu_{i,j} = tb_{i,j} + ts_{i,j}$.

A partir dos parâmetros previamente obtidos, pode-se estimar o fator de intermitência da j-ésima unidade, β_j , através da relação entre o comprimento da j-ésima bolha alongada e o comprimento da j-ésima unidade, conforme apresentado na Equação 4.8, sendo o comprimento da unidade é expresso pela soma do comprimento da bolha alongada e do pistão de líquido:

$$\beta_j = \frac{L_{Bj}}{L_{uj}} , \quad (4.8)$$

onde L_{uj} é o comprimento da j-ésima unidade determinado por $L_{uj} = L_{Bj} + L_{sj}$.

A taxa média de coalescência das estruturas entre duas estações de medição consecutivas, \bar{C} , é definida pela Equação 4.9:

$$\bar{C} = -100 \frac{\ln \left(\frac{\bar{f}_{q+1}}{\bar{f}_q} \right)}{\Delta L} , \quad (4.9)$$

onde \bar{f}_q é a frequência média de passagem de golfadas na q-ésima estação de medição e ΔL é a distância entre as estações de medição consecutivas.

Os sinais analógicos de corrente elétrica oriundos dos transdutores de pressão SMAR[®] modelo LD301 são convertidos em valores de pressão através da equação de calibração do respectivo transdutor de pressão.

A velocidade de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento da bolha alongada, o comprimento do pistão de líquido, a frequência de passagem de golfadas e o fator de intermitência são considerados dados discretos, já que são avaliados no instante de tempo que a bolha alongada da unidade correspondente entra em contato com o sensor de

condutância à jusante de determinada estação de medição. Por outro lado, os sinais de fração de vazio e de pressão são considerados dados contínuos, posto que são adquiridos com a taxa de amostragem estabelecida.

Por fim, o módulo de Pós-Processamento determina a função densidade de probabilidade das propriedades calculadas pelo módulo de Processamento Principal, além de possibilitar a correlação de diferentes parâmetros físicos.

Concluída essa etapa de processamento de dados, obtêm-se a evolução temporal da voltagem adimensional normalizada e da pressão, além de uma lista das propriedades do escoamento intermitente, tais como: velocidade de translação do nariz da bolha alongada, comprimento da bolha alongada, comprimento do pistão de líquido, frequência de passagem de golfadas e fator de intermitência para as quatro estações de medição. As listas das propriedades geométricas e cinemáticas das 100 aquisições de cada teste experimental são agrupadas e ordenadas temporalmente pelo instante de tempo que a bolha alongada de cada unidade entra em contato com a haste metálica do sensor de condutância à jusante de determinada estação de medição. A lista dos parâmetros geométricos e cinemáticos resultante possui aproximadamente 15000 unidades. Embora os dados sejam discretos, é possível avaliar o comportamento temporal das propriedades geométricas e cinemáticas, praticamente de forma contínua, durante todo o período de aquisição nas quatro estações de medição.

A Figura 4.11 apresenta as propriedades discretas da estação de medição 3 referentes às 100 aquisições do teste #2 e a correspondente média móvel centrada de 31 pontos. A evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional da bolha alongada e do comprimento adimensional do pistão de líquido estão expostos, respectivamente, nas Figuras 4.11a-c, enquanto o fator de intermitência e a frequência de passagem de golfadas são demonstrados, respectivamente, nas Figuras 4.11d-e. Os símbolos representam as propriedades discretas avaliadas no instante de tempo que determinada unidade entra em contato com a haste metálica do sensor de condutância à jusante e os traços contínuos revelam a linha de tendência obtida por meio da aplicação de uma média móvel centrada de 31 pontos. Percebe-se que os dados discretos exibem saltos coincidentes com a passagem das ondas de fração de vazio ou de pressão, em concordância com a análise desenvolvida no Capítulo 5.

As dispersões dos dados experimentais observadas nas Figuras 4.11 e 4.12 ocorrem devido ao processo de formação de golfadas, no qual as bolhas alongadas e os pistões de líquido são criados com diferentes comprimentos e propagam-se com velocidades distintas ao longo da seção de teste, consoante à Nydal *et al.* (1992) e Ujang *et al.* (2006).

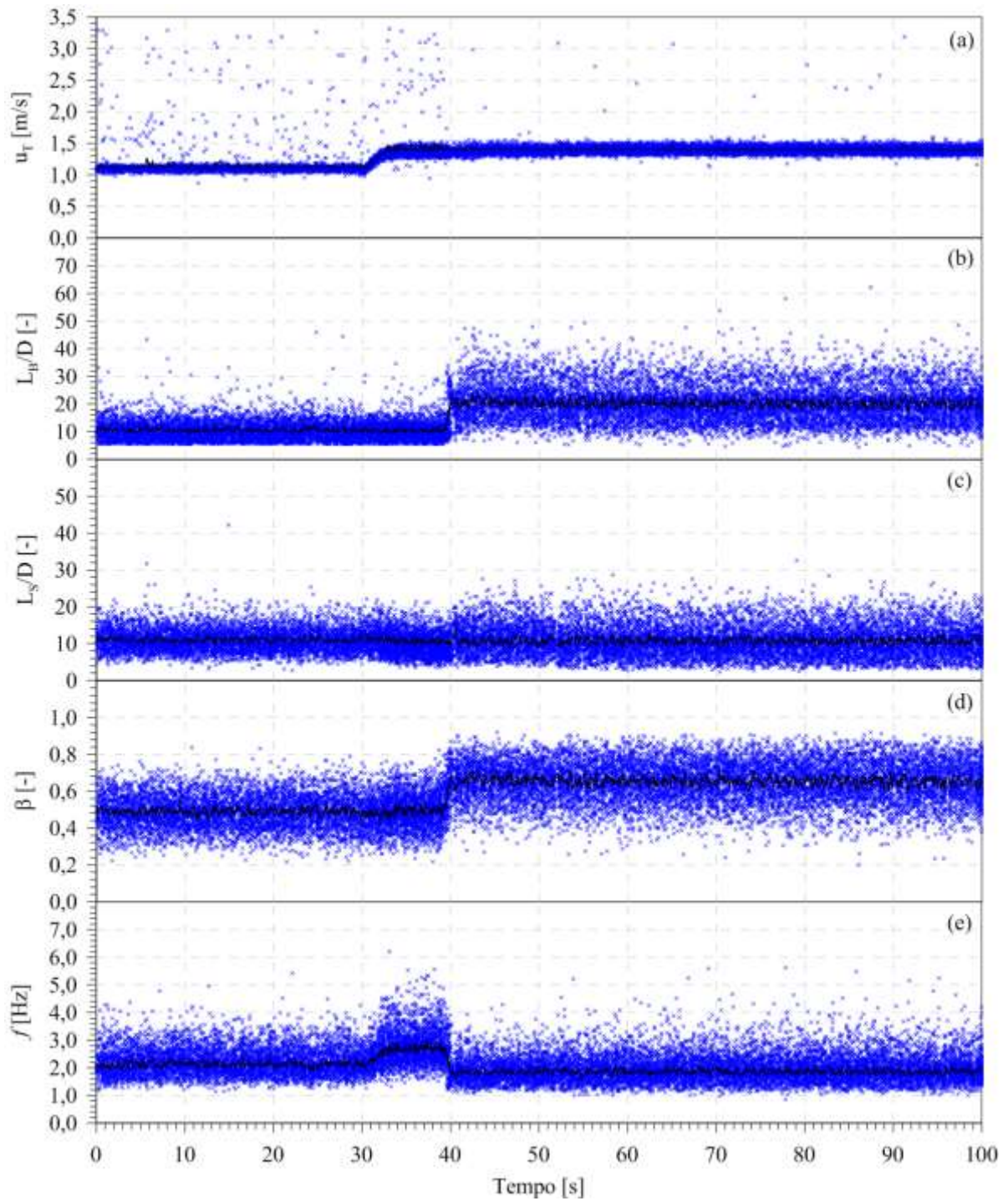


Figura 4.11. Propriedades cinemáticas e geométricas do escoamento intermitente das 100 aquisições da estação de medição 3 do teste #2. **(a)** Velocidade de translação do nariz da bolha alongada; **(b)** comprimento adimensional da bolha alongada; **(c)** comprimento adimensional do pistão de líquido; **(d)** fator de intermitência e **(e)** frequência de passagem de golfadas.

Similarmente à Figura 4.11, a Figura 4.12 apresenta as propriedades geométricas e cinemáticas da estação de medição 3 referentes às 100 aquisições do teste #3 e a correspondente média móvel centrada de 31 pontos. As Figuras 4.1a-e exibem,

respectivamente, o comportamento temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional da bolha alongada, do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas. De maneira análoga à Figura 4.11, nota-se a ocorrência de saltos concomitantes à passagem das ondas de fração de vazio ou de pressão. Para melhor entendimento, ressalta-se que somente as médias móveis centradas de 31 pontos serão utilizadas nas posteriores investigações fenomenológicas. Destaca-se ainda que a descontinuidade observada na Figura 4.12 ocorre devido à passagem de uma unidade atípica composta por uma bolha alongada de aproximadamente 150 D seguida por um pistão de líquido de praticamente 40 D.

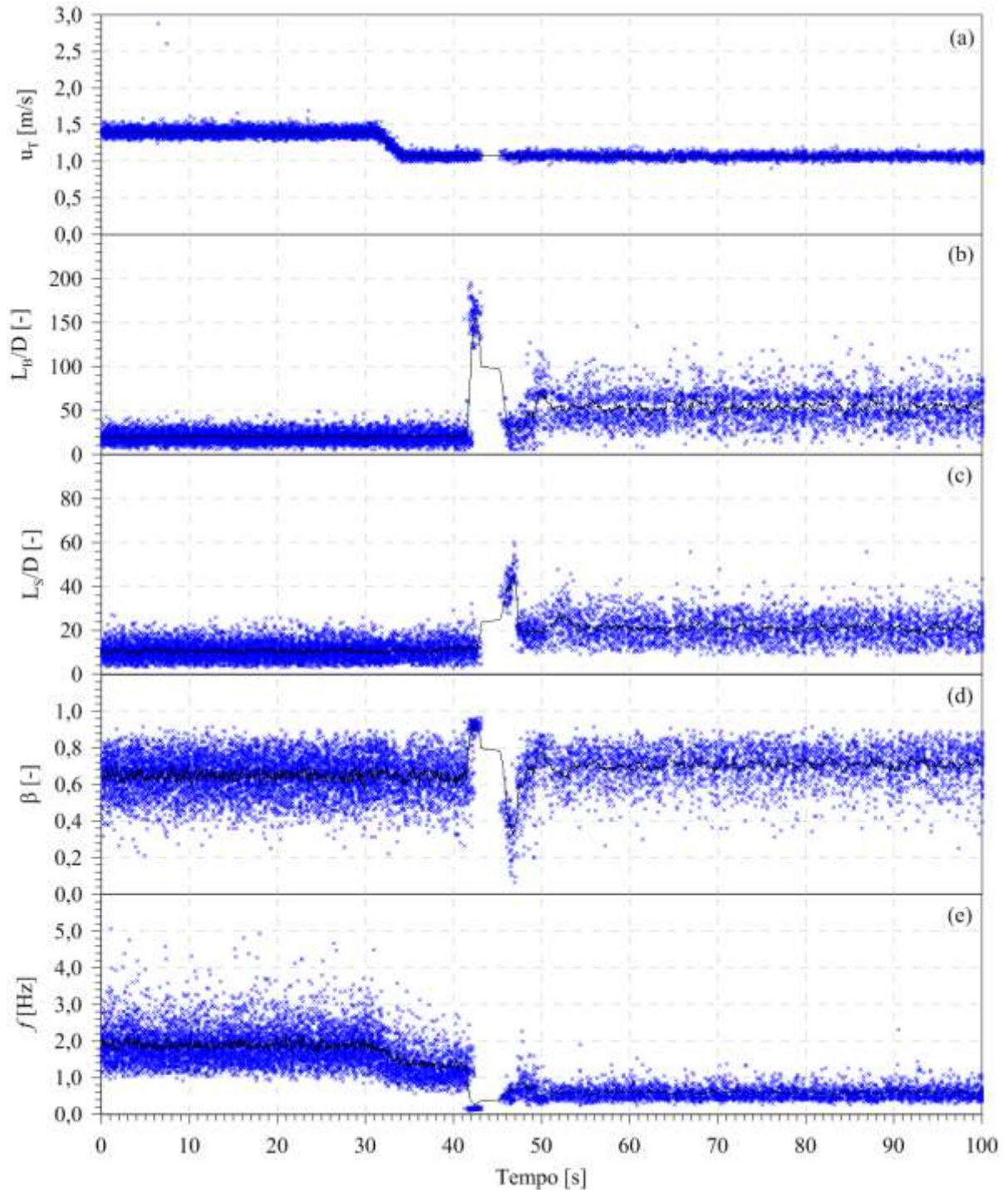


Figura 4.12. Propriedades cinemáticas e geométricas do escoamento intermitente das 100 aquisições da estação de medição 3 do teste #3. **(a)** Velocidade de translação do nariz da bolha alongada; **(b)** comprimento adimensional da bolha alongada; **(c)** comprimento adimensional do pistão de líquido; **(d)** fator de intermitência e **(e)** frequência de passagem de golfadas.

4.3 Análise de Incertezas

A Tabela 4.5 exhibe as incertezas relativas das propriedades médias contínuas, das velocidades de propagação das ondas e dos parâmetros médios geométricos e cinemáticos do escoamento intermitente. Na análise de incertezas relativas, utilizaram-se os dados pertencentes ao teste #1, enquanto a incerteza absoluta da pressão média coincide com a resolução máxima do instrumento de calibração. Por fim, expandiram-se os resultados para os demais testes experimentais. O procedimento detalhado da estimativa das incertezas está descrito no Apêndice A.

Tabela 4.5. Incertezas das propriedades médias contínuas, das velocidades das ondas e dos parâmetros médios discretos para os quatro testes experimentais.

Propriedade	Símbolo	Valor Numérico
Incerteza Relativa da Fração de Vazio Média	$\varepsilon \bar{\alpha}$	$\pm 1,0\%$
Incerteza Absoluta da Pressão Média	$\delta \bar{P}$	$\pm 0,1 \text{ kPa}$
Incerteza Relativa da Velocidade da Onda de Fração de Vazio	εc_{α}	$\pm 0,8\%$
Incerteza Relativa da Velocidade da Onda de Pressão	εc_p	$\pm 5,5\%$
Incerteza Relativa da Velocidade Superficial Média da Fase Líquida	$\varepsilon \bar{J}_L$	$\pm 1,5\%$
Incerteza Relativa da Velocidade Superficial Média da Fase Gasosa	$\varepsilon \bar{J}_G$	$\pm 3,8\%$
Incerteza Relativa da Velocidade Média de Translação do Nariz da Bolha Alongada	$\varepsilon \bar{u}_T$	$\pm 1,7\%$
Incerteza Relativa do Comprimento Adimensional Médio da Bolha Alongada	$\varepsilon \bar{L}_B/D$	$\pm 4,8\%$
Incerteza Relativa do Comprimento Adimensional Médio do Pistão de Líquido	$\varepsilon \bar{L}_S/D$	$\pm 5,4\%$
Incerteza Relativa do Fator Médio de Intermitência	$\varepsilon \bar{\beta}$	$\pm 6,8\%$
Incerteza Relativa da Frequência Média de Passagem de Golfadas	$\varepsilon \bar{f}$	$\pm 0,9\%$
Incerteza Relativa da Taxa Média de Coalescência	$\varepsilon \bar{C}$	$\pm 1,9\%$

Os sinais médios de $(1-V^*)$ obtidos através do processo de média de conjunto para 100 aquisições apresentam flutuações ocasionadas pela passagem alternada de pistões de líquido e bolhas alongadas, conforme retratado nas Figuras 4.1c e 4.3c. Converteram-se os sinais médios de $(1-V^*)$ das 100 aquisições referentes às quatro estações de medição do teste #1 em sinais médios de fração de vazio através da curva de calibração dos respectivos sensores de

condutância e estimaram-se as médias e os desvios padrões dos estados inicial e final. Aplicou-se a distribuição *t-Student* expressa pela Equação 4.10 e um intervalo de confiabilidade de 95% para determinar a incerteza absoluta da fração de vazio:

$$\delta\bar{\alpha} = \frac{t_v \sigma}{\sqrt{N}}, \quad (4.10)$$

onde $\delta\bar{\alpha}$ é a incerteza absoluta da fração de vazio média, t_v é o coeficiente *t-Student* dependente do intervalo de confiabilidade adotado e do número de amostras, σ é o desvio padrão e N é o número de amostras. Posteriormente, determinaram-se as incertezas relativas da fração de vazio média através da relação entre a incerteza absoluta da fração de vazio média e o valor médio de fração de vazio, conforme expresso na Equação 4.11.

$$\varepsilon\bar{\alpha} = \frac{\delta\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \quad (4.11)$$

onde $\varepsilon\bar{\alpha}$ é a incerteza relativa da fração de vazio média. Por fim, encontrou-se a incerteza relativa média da fração de vazio média para as quatro estações de medição, o que equivale a 1,0%.

Calibraram-se os transdutores de pressão instalados na seção de teste com auxílio de um manômetro de mercúrio com resolução máxima de 1 mm de mercúrio. Por conseguinte, a incerteza absoluta da pressão média corresponde a $\pm 0,1$ kPa para os quatro testes experimentais.

A definição dos perfis médios de fração de vazio e pressão melhora com o aumento do número de aquisições empregadas no processo de média de conjunto, conforme observado nas Figuras 4.1 a 4.4. Entretanto, os sinais médios de fração de vazio e pressão para 100 aquisições ainda apresentam flutuações, o que inviabiliza a adequada determinação das velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão. Na análise de incertezas das velocidades de propagação das ondas, dividiram-se as 100 aquisições do teste #1 em 10 grupos e calcularam-se as velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão para cada um dos grupos, bem como as velocidades médias e os desvios padrões. De modo semelhante à incerteza da fração de vazio média, empregou-se a distribuição *t-Student* e um intervalo de confiabilidade de 95% para estimar a incerteza absoluta das velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão. Por fim, determinou-se a incerteza relativa da velocidade da onda de fração de vazio de 0,8%, enquanto a incerteza relativa da velocidade da onda de pressão corresponde a 5,5%.

As equações empregadas na determinação dos parâmetros geométricos e cinemáticos descritas na Seção 4.2, em conjunto com a influência do fator de corte afetam diretamente a

estimativa das incertezas relativas referentes às propriedades médias discretas, conforme retratado no Apêndice A. A incerteza relativa na medição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada é 1,7%, à medida que os comprimentos adimensionais médios da bolha alongada e do pistão de líquido apresentam incertezas relativas de, respectivamente, 4,8% e 5,4%. O fator médio de intermitência e a frequência média de passagem de golfadas demonstram incertezas relativas de, respectivamente, 6,8% e 0,9%, ao mesmo tempo em que a taxa média de coalescência possui incerteza relativa igual a 1,9%.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

As condições operacionais para os quatro testes experimentais são descritas na primeira seção e a análise das imagens estão exibidas na segunda seção deste capítulo. As propriedades contínuas e discretas do escoamento intermitente são abordadas, respectivamente, na terceira e quarta seção. A análise mecanicista das ondas de fração de vazio e de pressão está desenvolvida na quinta seção. A sexta seção demonstra as velocidades experimentais das ondas de fração de vazio e de pressão, enquanto a sétima seção exibe as estimativas dos modelos e correlações de predição das velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão.

5.1 Condições Operacionais

A Tabela 5.1 apresenta as velocidades superficiais médias das fases gasosa e líquida, juntamente com as respectivas incertezas absolutas estimadas no injetor de correntes paralelas, nas quatro estações de medição e na saída da seção de teste para os estados inicial e final referentes aos quatro testes experimentais conduzidos. As velocidades superficiais médias informadas na Tabela 5.1 correspondem ao valor médio das 100 aquisições realizadas para cada teste experimental nos estados inicial e final.

O teste #1 compreende a diminuição súbita da vazão volumétrica de ar, enquanto a vazão volumétrica de água permanece aproximadamente inalterada. A primeira coluna da Tabela 5.1 apresenta as velocidades superficiais médias de líquido e gás no injetor de correntes paralelas, nas quatro estações de medição e na saída da seção de teste para o teste #1. As velocidades superficiais médias de líquido e gás no injetor de correntes paralelas para o estado inicial são, respectivamente, 0,60 m/s e 0,53 m/s, ao passo que as velocidades superficiais médias de líquido e de gás na entrada da seção de teste durante o estado final são, respectivamente, 0,60 m/s e 0,27 m/s.

O teste #2 consiste no aumento brusco da vazão volumétrica de gás, ao passo que vazão volumétrica de água é mantida praticamente constante, em concordância com a segunda coluna da Tabela 5.1. No estado inicial, as velocidades superficiais médias de água e ar no injetor de correntes paralelas são, respectivamente, 0,60 m/s e 0,27 m/s. Após o período

transiente, as velocidades superficiais médias da fase líquida e gasosa tornam-se, respectivamente, 0,59 m/s e 0,52 m/s.

O teste #3 refere-se à redução abrupta da vazão volumétrica de água, ao mesmo tempo em que a vazão volumétrica de ar permanece estável, consoante à terceira coluna da Tabela 5.1. Inicialmente, as velocidades superficiais médias de líquido e gás na entrada da seção de teste são, respectivamente, 0,60 m/s e 0,53 m/s. Após o período transiente, as velocidades superficiais médias de líquido e de gás são, respectivamente, 0,30 m/s e 0,56 m/s.

O teste #4 corresponde ao aumento repentino da vazão volumétrica de líquido, à medida que a vazão volumétrica de ar mantém-se inalterada, de acordo com a quarta coluna da Tabela 5.1. No período inicial do teste, as velocidades superficiais médias de líquido e gás no injetor de correntes paralelas são, respectivamente, 0,30 m/s e 0,57 m/s. No período final, as velocidades superficiais médias de líquido e gás tornam-se, respectivamente, 0,60 m/s e 0,54 m/s.

Na Tabela 5.1, observa-se que as velocidades superficiais médias das fases líquida e gasosa do estado inicial para o teste #1 são praticamente iguais às velocidades superficiais médias do estado final para o teste #2. Ademais, as velocidades superficiais médias de líquido e gás depois do período transiente para o teste #1 são similares às velocidades superficiais médias antes do período transiente para o teste #2. De modo semelhante, as velocidades superficiais médias de água e ar do estado inicial para o teste #3 são aproximadamente iguais às velocidades superficiais médias do estado final para o teste #4. Além disso, as velocidades superficiais médias de líquido e gás antes do transiente para o teste #3 são similares às velocidades superficiais médias após o transiente para o teste #4. Por fim, verifica-se que o estado inicial dos testes #1 e #3 e o estado final dos testes #2 e #4 apresentam velocidades superficiais médias de líquido e gás aproximadamente iguais para as quatro estações de medição.

Tabela 5.1. Velocidades superficiais médias de gás e líquido no injetor de correntes paralelas, nas quatro estações de medição e na saída da seção de teste nos estados inicial e final para os quatro testes experimentais.

		Teste #1		Teste #2		Teste #3		Teste #4	
		\bar{J}_L	\bar{J}_G	\bar{J}_L	\bar{J}_G	\bar{J}_L	\bar{J}_G	\bar{J}_L	\bar{J}_G
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
Estado Inicial	Injetor	0,60 $\pm 0,01$	0,53 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,27 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,01$	0,53 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,57 $\pm 0,02$
	E1	0,60 $\pm 0,01$	0,54 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,28 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,01$	0,54 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,57 $\pm 0,02$
	E2	0,60 $\pm 0,01$	0,55 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,28 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,01$	0,55 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,58 $\pm 0,02$
	E3	0,60 $\pm 0,01$	0,56 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,29 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,01$	0,57 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,58 $\pm 0,02$
	E4	0,60 $\pm 0,01$	0,58 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,30 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,02$
	Saída	0,60 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,30 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,02$
Estado Final	Injetor	0,60 $\pm 0,01$	0,27 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,01$	0,52 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,56 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,54 $\pm 0,02$
	E1	0,60 $\pm 0,01$	0,27 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,01$	0,53 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,57 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,55 $\pm 0,02$
	E2	0,60 $\pm 0,01$	0,28 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,01$	0,54 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,57 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,56 $\pm 0,02$
	E3	0,60 $\pm 0,01$	0,28 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,01$	0,55 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,58 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,57 $\pm 0,02$
	E4	0,60 $\pm 0,01$	0,29 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,01$	0,58 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,58 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,60 $\pm 0,02$
	Saída	0,60 $\pm 0,01$	0,30 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,02$	0,30 $\pm 0,01$	0,59 $\pm 0,02$	0,60 $\pm 0,01$	0,61 $\pm 0,02$

As velocidades superficiais médias na saída da seção de teste para os quatro testes experimentais estão plotadas no mapa de fluxo horizontal de Taitel e Dukler (1976), conforme apresentado na Figura 5.1. Percebe-se que todas as combinações de velocidades superficiais médias de gás e líquido abordadas estão contidas na região do padrão intermitente.

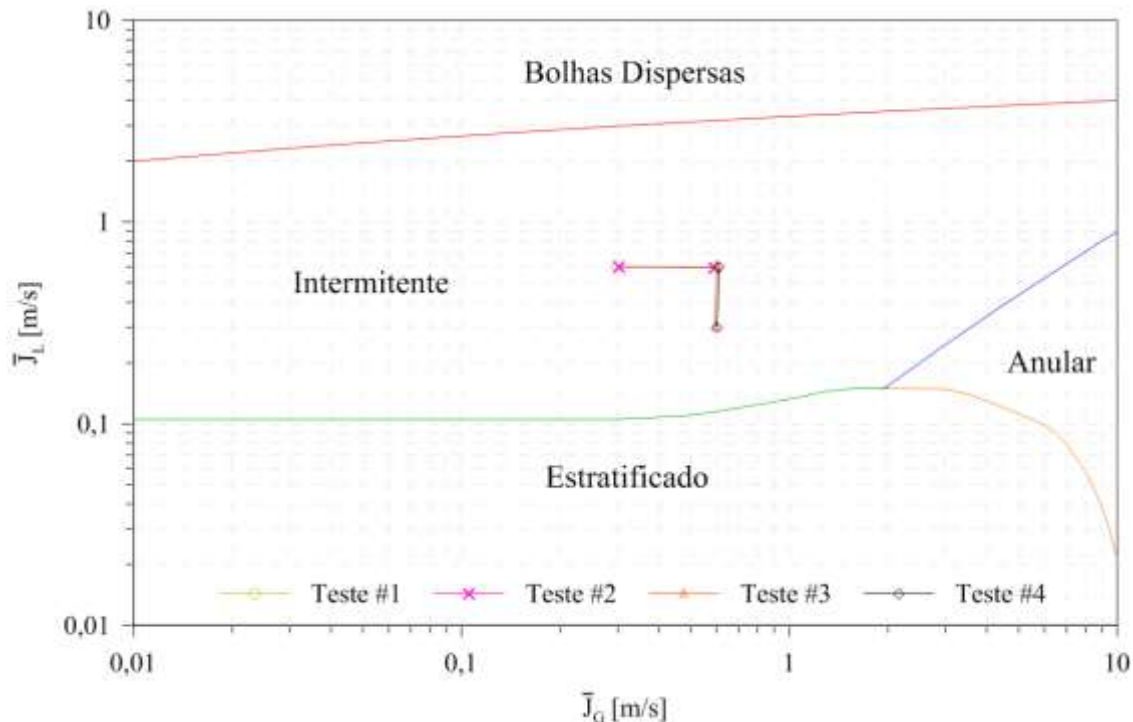


Figura 5.1. Mapa de fluxo horizontal de Taitel e Dukler (1976) para escoamento bifásico de ar e água com as velocidades superficiais médias de gás e líquido para os quatro testes experimentais.

5.2 Análise das Imagens

O nariz, o corpo e a cauda da bolha alongada referentes ao estado final do teste #1 e ao estado inicial do teste #2 estão retratados, respectivamente, nas Figuras 5.2a-c. As Figuras 5.2d-f descrevem, respectivamente, o nariz, o corpo e a cauda da bolha alongada correspondentes ao estado final do teste #3 e ao estado inicial do teste #4. Por fim, as Figuras 5.2g-i demonstram, respectivamente, o nariz, o corpo e a cauda pertencentes aos estados iniciais dos testes #1 e #3 e aos estados finais dos testes #2 e #4. A Figura 5.2 retrata as características do escoamento intermitente registradas a 572 D à jusante do injetor de correntes paralelas. Nota-se que as formas da bolha alongada não demonstram diferenças significativas e a espessura do filme de líquido abaixo da bolha alongada exibe pequena variação, bem como a interface gás-líquido praticamente plana nas condições operacionais executadas. Ademais, como as velocidades superficiais de líquido e gás são suficientemente baixas para que o ar seja transportado unicamente pelas bolhas alongadas, têm-se pistões de líquido não aerados, consoante à Figura 5.2.

O número de Reynolds baseado na velocidade superficial de mistura relaciona as forças inerciais e viscosas do escoamento através da Equação 5.1:

$$Re = \frac{JD}{\nu}, \quad (5.1)$$

onde Re é o número de Reynolds baseado na velocidade superficial de mistura, J é a velocidade superficial de mistura, D é o diâmetro interno da seção de teste e ν é a viscosidade cinemática da água. Como a pressão atmosférica local média é de 93,7 kPa e a temperatura local média manteve-se em 25 °C para os quatro testes experimentais, assume-se a viscosidade cinemática da água nessas condições. O número de Reynolds baseado na velocidade superficial de mistura varia entre 25200 e 34800 para as condições operacionais executadas, o que indica que o escoamento de líquido encontra-se no regime turbulento.

Adicionalmente, o número de Froude, simbolizado por Fr, é expresso pela Equação 5.2:

$$Fr = \frac{J}{\sqrt{gD}}, \quad (5.2)$$

e varia entre 1,7 e 2,4 para os quatro testes experimentais.

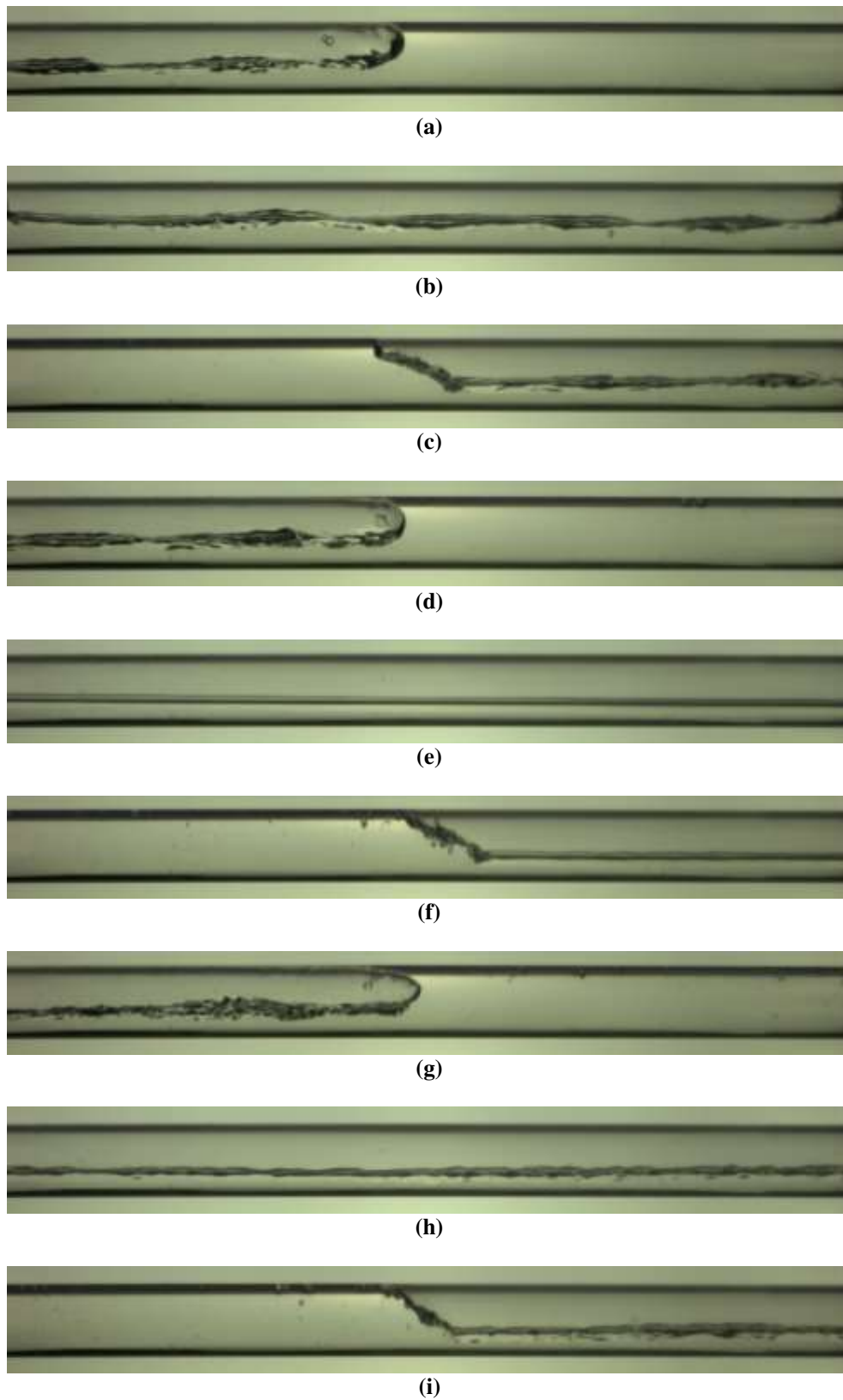


Figura 5.2. Nariz, corpo e cauda da bolha alongada referentes aos estados inicial e final para os quatro testes experimentais.

5.3 Propriedades Contínuas: Fração de Vazio e Pressão

A primeira subseção apresenta os valores médios de fração de vazio e de pressão para as condições operacionais analisadas. A evolução temporal da fração de vazio e da pressão estão retratados na segunda subseção, enquanto os gradientes médios de pressão para os quatro testes experimentais estão exibidos na terceira subseção.

5.3.1 Fração de Vazio e Pressão Médias na Seção de Teste

A fração de vazio e a pressão médias correspondem aos valores médios das 100 aquisições nos estados inicial e final para cada uma das condições operacionais. Os valores médios de fração de vazio e de pressão nas quatro estações de medição para os quatro testes experimentais estão apresentados na Tabela 5.2. No teste #1, percebe-se que a redução da velocidade superficial da fase gasosa causa a diminuição da fração de vazio e da pressão. Por outro lado, no teste #2, a elevação da velocidade superficial da fase gasosa implica no aumento da fração de vazio e da pressão. A elevação da fração de vazio e a diminuição da pressão observadas no teste #3 são originadas pela redução da velocidade superficial da fase líquida. O aumento da velocidade superficial da fase líquida provoca a redução da fração de vazio e a elevação da pressão no teste #4. Desse modo, verifica-se que a fração de vazio é proporcional à velocidade superficial da fase gasosa e inversamente proporcional à velocidade superficial da fase líquida.

Constata-se que os valores médios de fração de vazio permanecem sensivelmente inalterados nos estados inicial e final para os quatro testes experimentais. As frações de vazio e pressões médias depois do período transiente para o teste #1 são aproximadamente iguais às propriedades contínuas encontradas antes do período transiente para o teste #2. As frações de vazio e pressões médias depois do período transiente para o teste #3 são praticamente iguais aos valores obtidos no estado inicial para o teste #4. Além disso, as propriedades contínuas do estado inicial para os testes #1 e #3 são sensivelmente iguais aos valores médios do estado final para os testes #2 e #4. As semelhanças das frações de vazio e pressões médias antes e depois do período transiente são justificadas pelas similaridades das velocidades superficiais de líquido e gás, conforme observado na Tabela 5.2. Ademais, constata-se que mudanças

simétricas das velocidades superficiais de gás e líquido resultam em valores médios de fração de vazio e pressão semelhantes, consoante à Tabela 5.2, o que evidencia que o escoamento bifásico no padrão golfadas retorna às características iniciais, uma vez que a onda de fração de vazio egressa totalmente da seção de teste.

Tabela 5.2. Frações de vazio médias e pressões médias nas quatro estações de medição para os quatro testes experimentais.

		Teste #1		Teste #2		Teste #3		Teste #4	
		$\bar{\alpha}$ [-]	\bar{p} [kPa]	$\bar{\alpha}$ [-]	\bar{p} [kPa]	$\bar{\alpha}$ [-]	\bar{p} [kPa]	$\bar{\alpha}$ [-]	\bar{p} [kPa]
Estado Inicial	E1	0,39	104,6	0,25	102,5	0,39	104,6	0,54	98,1
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$
	E2	0,40	102,6	0,25	101,0	0,40	102,6	0,54	97,5
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$
	E3	0,40	100,0	0,26	98,7	0,40	99,9	0,54	96,5
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$
	E4	0,41	96,1	0,26	95,7	0,41	96,1	0,54	95,2
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$
Estado Final	E1	0,25	102,6	0,40	104,6	0,54	98,0	0,40	104,7
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$
	E2	0,25	101,1	0,40	102,5	0,54	97,4	0,40	102,6
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$
	E3	0,25	98,8	0,40	99,9	0,54	96,4	0,41	100,0
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$
	E4	0,25	95,8	0,41	96,0	0,54	95,1	0,42	96,1
		$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$

5.3.2 Evolução Temporal das Velocidades Superficiais, da Fração de Vazio e da Pressão

Os perfis médios das velocidades superficiais de água e ar, da fração de vazio e da pressão apresentados nas Figuras 5.3 a 5.6 correspondem aos sinais resultantes do processo de média de conjunto das 100 aquisições conduzidas para cada teste experimental, conforme descrito na Seção 4.1. A evolução temporal das velocidades superficiais médias das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste referentes ao teste #1 estão expostas na Figura 5.3a. Os perfis médios de fração de vazio e de pressão para as quatro estações de medição estão exibidos, respectivamente, nas Figuras 5.3b e 5.3c.

Na Figura 5.3a, nota-se a queda súbita da velocidade superficial da fase gasosa, enquanto a velocidade superficial da fase líquida permanece praticamente constante. Os sinais médios da fração de vazio apresentam saltos no período transiente e pequenas flutuações nos estados inicial e final, conforme demonstrado na Figura 5.3b. A onda de fração de vazio apresenta forma conservativa e amplitude de salto constante ao longo da seção de teste.

Os sinais médios da pressão expostos na Figura 5.3c exibem patamares constantes antes e depois do período transiente. Após o salto praticamente instantâneo da pressão nas quatro estações de medição, verifica-se a ocorrência da pressão mínima, denominada *undershoot*, acompanhada de uma região aproximadamente constante, sobretudo nas estações de medição 3 e 4. O final dessa região coincide com a chegada da onda de fração de vazio na estação de medição correspondente. Em seguida, constata-se o aumento gradual da pressão até atingir o estado final. King *et al.* (1998) também registram a ocorrência do *undershoot* dos testes com redução da fase gasosa. A estabilização final da pressão ocorre quando a onda de fração de vazio sai completamente da seção de teste.

A redução repentina da velocidade superficial de gás origina uma onda de expansão, visto que a pressão do estado inicial é superior que a pressão do estado final. A onda de pressão não conserva a forma e exibe atenuação ao longo da seção de teste. Além disso, verifica-se que os intervalos de tempo da onda de fração de vazio entre as estações de medição são consideravelmente maiores que os intervalos encontrados para a onda de pressão, o que indica que a velocidade da onda de pressão é superior à velocidade da onda de fração de vazio.

A Figura 5.4a exibe a evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa no injetor de correntes paralelas pertencentes ao teste #2. As Figuras 5.4b e 5.4c retratam, respectivamente, os perfis médios de fração de vazio e de pressão para as quatro estações de medição.

Observa-se a elevação brusca da velocidade superficial da fase gasosa na Figura 5.4a, ao passo que a velocidade superficial da fase líquida mantém-se sensivelmente inalterada. Na Figura 5.4b, nota-se que os sinais médios de fração de vazio exibem dois patamares praticamente constantes e saltos entre os estados inicial e final. A onda de fração de vazio conserva a forma e não apresenta atenuação ao longo da seção de teste.

Nos instantes iniciais, os sinais médios de pressão expõem valores aproximadamente constantes seguidos de um aumento súbito na pressão e da ocorrência da pressão máxima, conhecida como *overshoot*, consoante à Figura 5.4c e ao registrado por King *et al.* (1998). A variação da pressão ocorre praticamente de maneira instantânea nas quatro estações de

medição. Observam-se regiões de pressão sensivelmente constante, especialmente nas estações de medição 3 e 4, seguidas pelo decaimento progressivo da pressão até alcançar o estado final. O término da região com pressão praticamente constante coincide com a chegada da onda de fração de vazio. A obtenção do estado final acontece quando a onda de fração de vazio egressa totalmente da seção de teste.

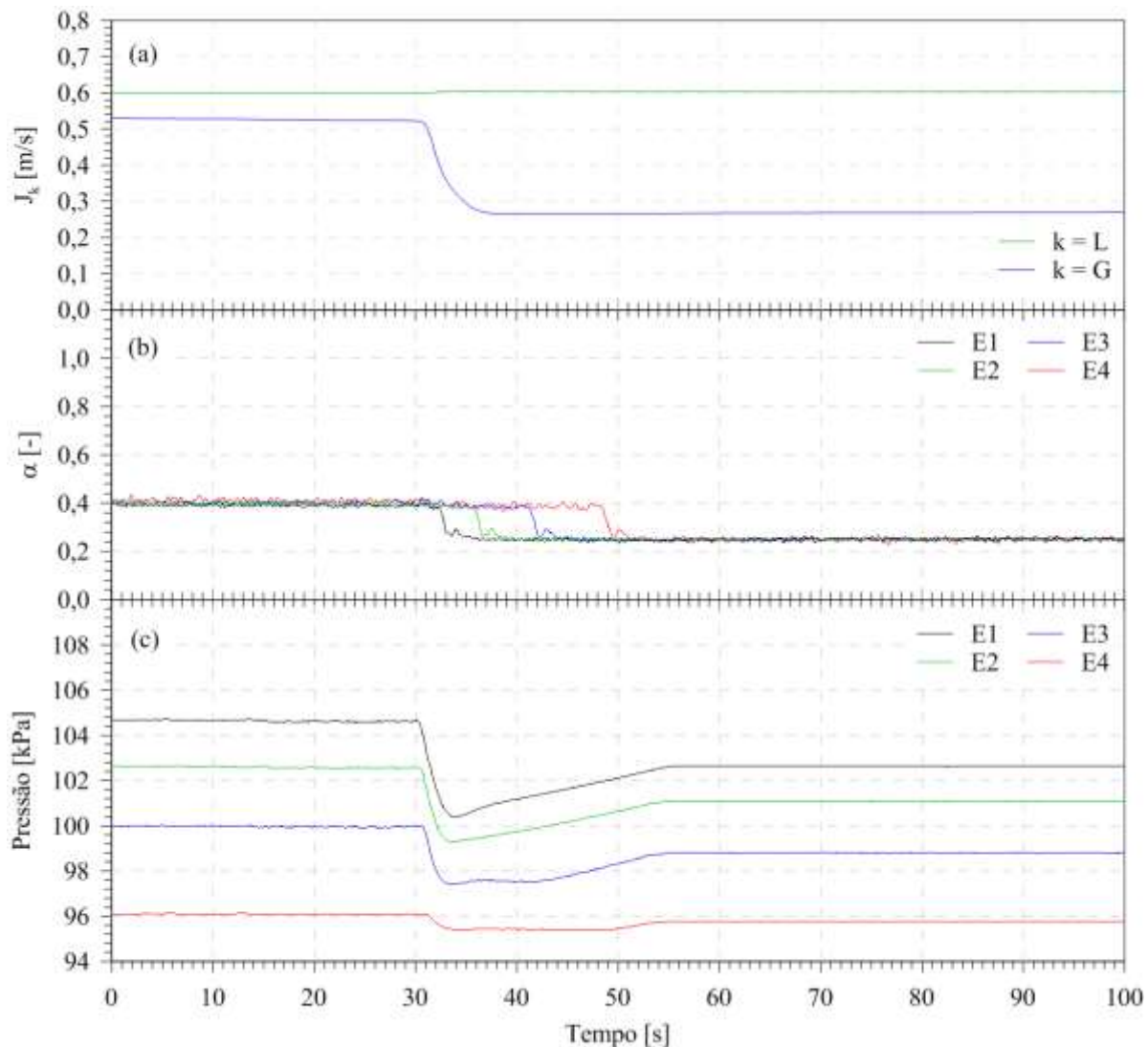


Figura 5.3. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #1.

O incremento súbito da velocidade superficial de ar promove a formação de uma onda de compressão, dado que a pressão antes do período transiente é inferior à pressão depois do período transiente. A onda de pressão apresenta forma dispersiva e atenua-se ao longo da seção de teste. Verifica-se que a velocidade da onda de fração de vazio é inferior a velocidade da onda de pressão devido ao tempo gasto do percurso entre as estações de medição. Além

disso, constata-se que os sinais médios de fração de vazio e de pressão para os testes experimentais com variações simétricas da fase gasosa, testes #1 e #2, são praticamente perfis espelhados em relação ao eixo horizontal.

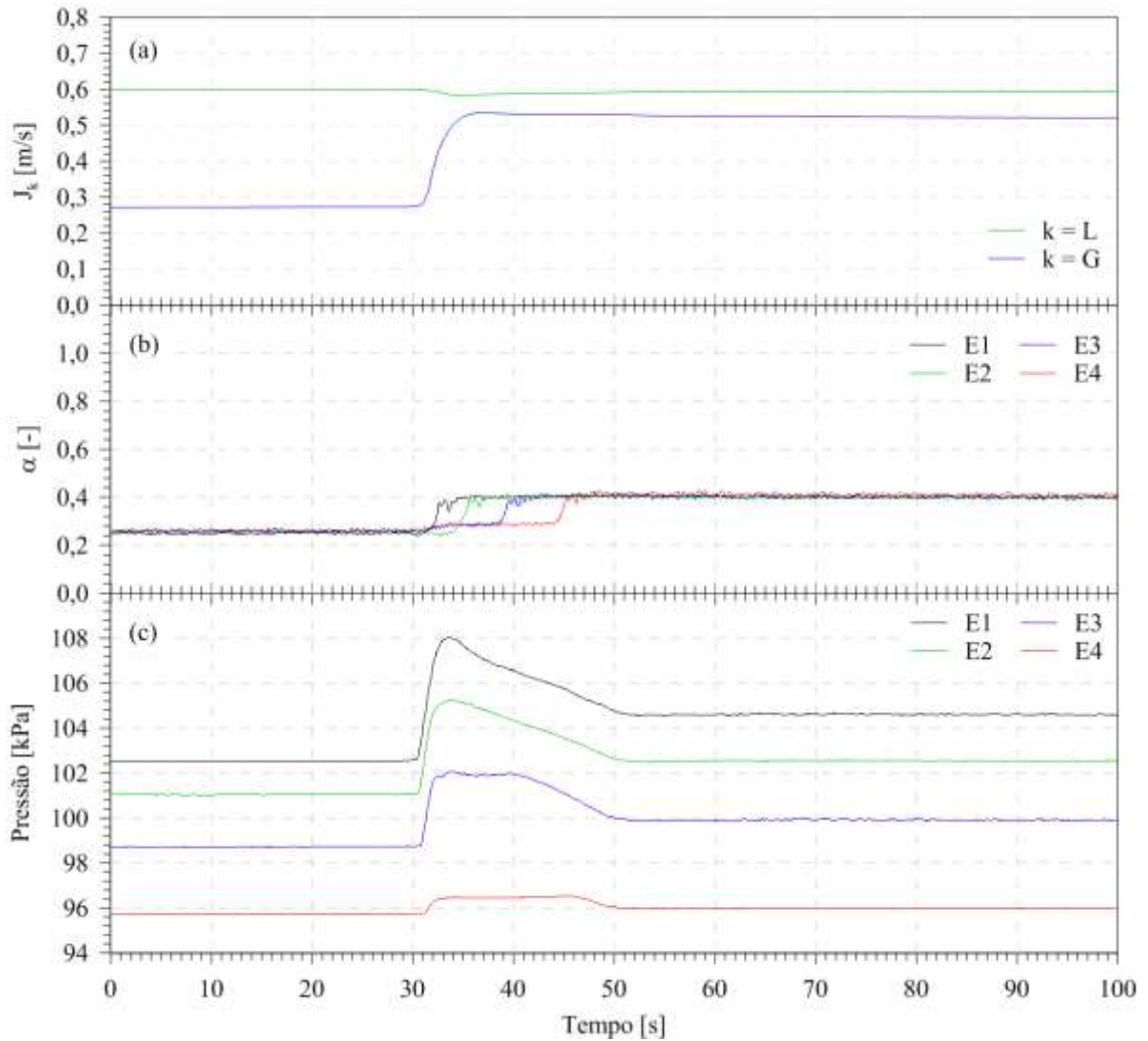


Figura 5.4. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #2.

De modo semelhante à análise dos testes experimentais causados pela variação súbita da fase gasosa, investigaram-se os perfis médios dos testes experimentais gerados pela mudança brusca da fase líquida. Os perfis médios das velocidades superficiais de líquido e gás na entrada da seção de teste correspondentes ao teste #3 estão expostos na Figura 5.5a. As Figuras 5.5b e 5.5c apresentam, respectivamente, os sinais médios da fração de vazio e da pressão para as quatro estações de medição.

A velocidade superficial da fase líquida é reduzida bruscamente, enquanto a velocidade superficial da fase gasosa permanece praticamente constante, em concordância com a Figura 5.5a. Os sinais médios de fração de vazio apresentam valores aproximadamente constantes antes e depois do período transiente, conforme observado na Figura 5.5b. Nas quatro estações de medição, as variações da fração de vazio causadas pela diminuição da fase líquida são íngremes e atingem o valor máximo da série temporal. Em seguida, os sinais médios da fração de vazio adquirem o valor mínimo e oscilam até alcançarem o estado final. Similarmente aos transientes com alteração repentina da fase gasosa, a onda de fração de vazio exibe forma conservativa e amplitude de salto constante.

Na Figura 5.5c, verifica-se que os sinais médios de pressão apresentam valores praticamente constantes antes e depois do período transiente. Na sequência, observa-se a queda brusca e praticamente simultânea da pressão nas quatro estações de medição acompanhada pelo decaimento irregular entre os estados inicial e final. No entanto, os estudos realizados por King *et al.* (1998) defendem que os transientes causados pela alteração súbita da fase líquida apresentam variações suaves entre os estados inicial e final. Percebe-se o aparecimento de regiões com valores de pressão aproximadamente constantes, sobretudo nas estações de medição 3 e 4. O término dessas regiões corresponde à chegada da onda de fração de vazio nas respectivas estações de medição. A pressão estabiliza-se após a saída completa da onda de fração de vazio.

A diminuição abrupta da velocidade superficial de líquido produz uma onda de expansão, dado que a pressão do estado inicial é maior do que a pressão do estado final. A onda de pressão revela forma dispersiva e atenua-se ao longo da seção de teste. As flutuações de pressão registradas no período transiente estão em sincronia com as oscilações da fração de vazio. Novamente, constata-se que a velocidade da onda de pressão é maior que a velocidade da onda de fração de vazio.

A Figura 5.6a demonstra a evolução temporal das velocidades superficiais de líquido e gás na entrada da seção de teste para o teste #4. Os sinais médios da fração de vazio e da pressão para as quatro estações de medição estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 5.6b e 5.6c.

A velocidade superficial da fase líquida aumenta bruscamente, à medida que a velocidade superficial da fase gasosa permanece praticamente inalterada, consoante à Figura 5.6a. Na Figura 5.6b, percebe-se que os sinais médios da fração de vazio exibem valores aproximadamente constantes nos estados inicial e final. Após o aumento brusco da velocidade superficial da fase líquida, o sinal médio da fração de vazio apresenta uma queda abrupta,

atinge o valor mínimo da série temporal e, na sequência, oscila até alcançar o patamar correspondente ao estado final. A onda de fração de vazio conserva a forma e não apresenta atenuação ao longo da seção de teste. Verifica-se que as oscilações da fração de vazio para o teste #3 são amortecidas mais lentamente do que as oscilações registradas para o teste #4, conforme observado nas Figuras 5.5b e 5.6b.

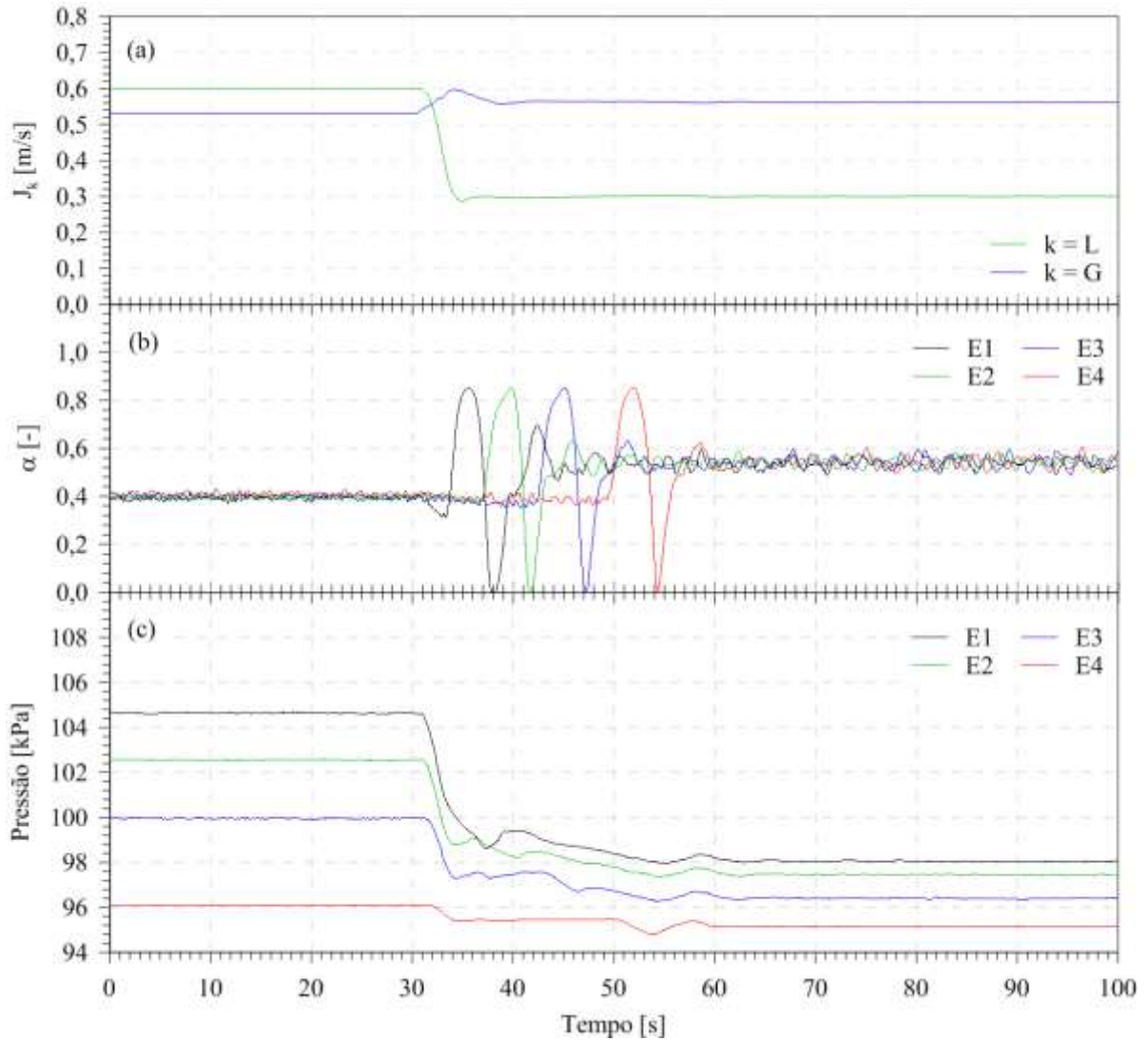


Figura 5.5. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #3.

Os sinais médios de pressão possuem valores sensivelmente constantes antes e depois do período transiente, em conformidade com a Figura 5.6c. Nota-se o crescimento repentino e praticamente simultâneo da pressão ao longo da seção de teste, acompanhado do aparecimento de regiões com valores aproximadamente constantes, sobretudo nas estações de medição 3 e 4. O término dessas regiões coincidem com a chegada da onda de fração de

vazio. Em seguida, percebe-se a aproximação instável até atingir o estado final. Contudo, King *et al.* (1998) afirmam que os transientes induzidos pela mudança da fase líquida mostram variações suaves entre os estados inicial e final, o que contraria a constatação efetuada no presente trabalho. A obtenção do estado final ocorre após a onda de fração de vazio sair completamente da seção de teste.

O acréscimo abrupto da velocidade superficial de água ocasiona uma onda de compressão, posto que a pressão antes do período transiente é menor que a pressão depois do período transiente. A onda de pressão não apresenta forma conservativa e revela atenuação ao longo da seção de teste. As flutuações dos sinais médios de pressão durante o período transiente coincidem com as oscilações dos sinais médios da fração de vazio. Como os intervalos da chegada da onda de fração de vazio entre as estações de medição são maiores que os intervalos encontrados para a onda de pressão, constata-se novamente que a velocidade da onda de fração de vazio é menor que a velocidade da onda de pressão. Observa-se ainda que os sinais médios de pressão para os testes experimentais com mudanças simétricas da fase líquida são aproximadamente perfis antissimétricos em relação ao eixo horizontal, enquanto os perfis médios de fração de vazio são significativamente distintos.

Percebe-se que os testes experimentais com redução da velocidade superficial de mistura são caracterizados por uma onda de expansão, visto que a diminuição da velocidade superficial de uma das fases causa a redução da pressão do estado final. Contrariamente, nota-se que os transientes com aumento da velocidade superficial de mistura são definidos por uma onda de compressão, posto que o aumento da velocidade superficial de um dos fluidos de teste ocasiona a elevação da pressão do estado final.

Ademais, constata-se que a onda de fração de vazio é não dispersiva, apresenta forma conservativa e amplitude de salto constante ao longo da seção de teste, conforme observado por Fabre *et al.* (1995). Por outro lado, a onda de pressão é dispersiva, não possui forma conservativa e demonstra atenuação ao longo da seção de teste, em concordância com Matsui *et al.* (1979) e Fabre *et al.* (1995).

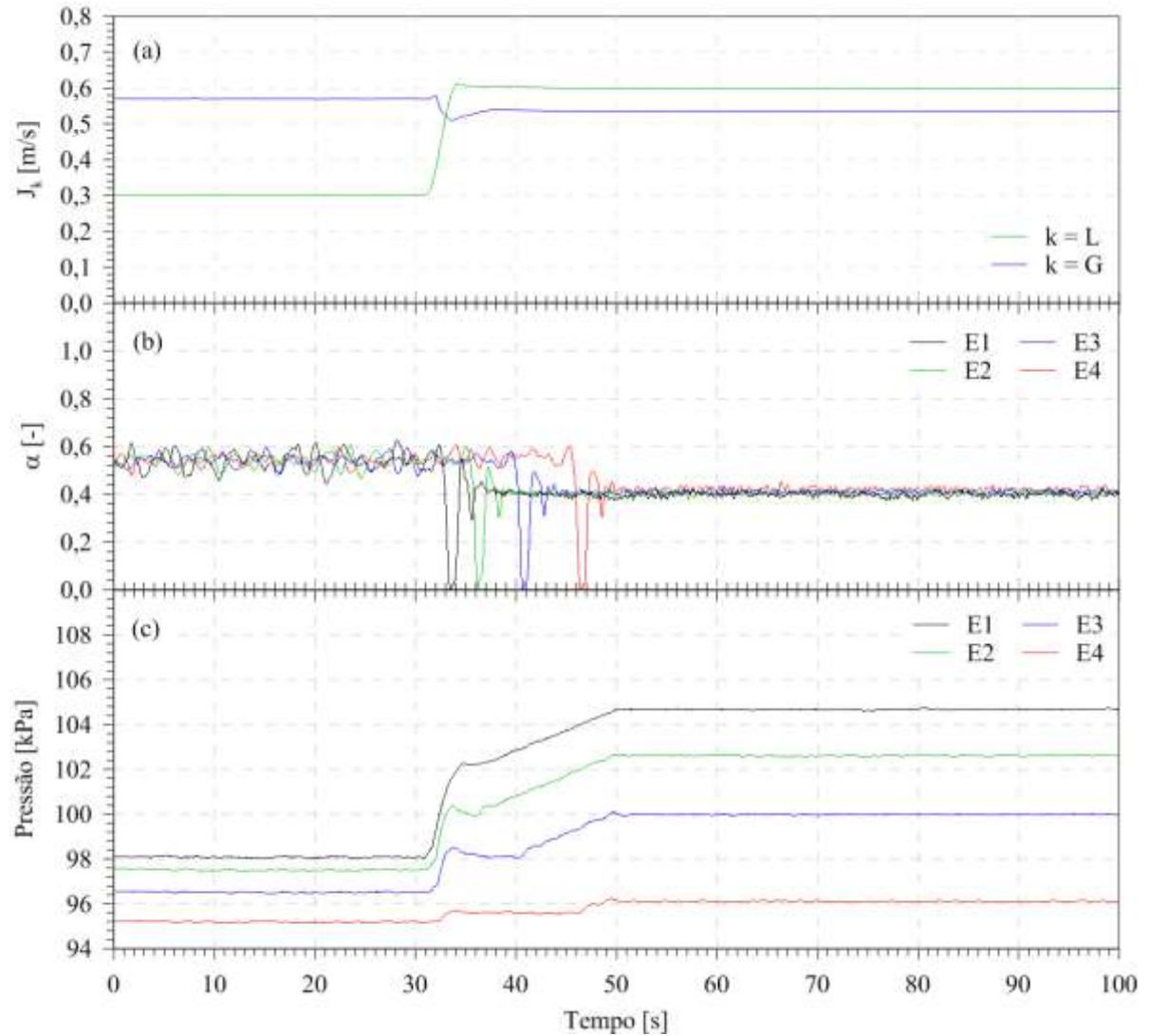


Figura 5.6. (a) Evolução temporal das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa na entrada da seção de teste; (b) evolução temporal da fração de vazio e (c) evolução temporal da pressão das quatro estações de medição para o teste #4.

5.3.3 Gradientes Médios de Pressão na Seção de Teste

Investigou-se o comportamento da pressão média ao longo da seção de teste através da análise das pressões médias registradas pelos quatro transdutores de pressão em função da distância entre o injetor de correntes paralelas e as quatro estações de medição. Encontraram-se coeficientes de correlação acima de 0,98 independentemente do instante de tempo avaliado para os quatro testes experimentais, o que confirma a queda linear de pressão na seção de teste.

A evolução temporal do gradiente médio de pressão está exibida na Figura 5.7. Verifica-se que os gradientes médios de pressão antes de 30 s e após 65 s são sensivelmente constantes para as quatro condições operacionais e correspondem aos estados inicial e final. Os gradientes médios de pressão para os transientes induzidos pela alteração da fase gasosa, testes #1 e #2, são imagens horizontalmente espelhadas. Nos testes #1 e #2, observam-se variações abruptas nos instantes iniciais do período transiente acompanhadas pela recuperação gradativa até atingir o patamar correspondente ao estado final. Para os transientes gerados pela mudança da fase líquida, os gradientes médios de pressão são imagens aproximadamente espelhadas em relação ao eixo horizontal, uma vez que a obtenção do estado final acontece em instantes de tempo consideravelmente distintos. Nota-se um acréscimo gradual no gradiente médio de pressão do teste #3 seguido pela posterior estabilização, enquanto o teste #4 mostra um decaimento progressivo até alcançar a região praticamente constante pertencente ao estado final.

Percebe-se a superposição dos gradientes médios de pressão no estado inicial para os testes #1 e #3, uma vez que as fases líquida e gasosa escoam com velocidades superficiais aproximadamente iguais antes do período transiente, consoante à Tabela 5.1. Observa-se também que os gradientes médios de pressão no estado final para os testes #2 e #4 estão superpostos devido às velocidades superficiais de ar e água apresentarem magnitudes semelhantes, conforme exposto na Tabela 5.1.

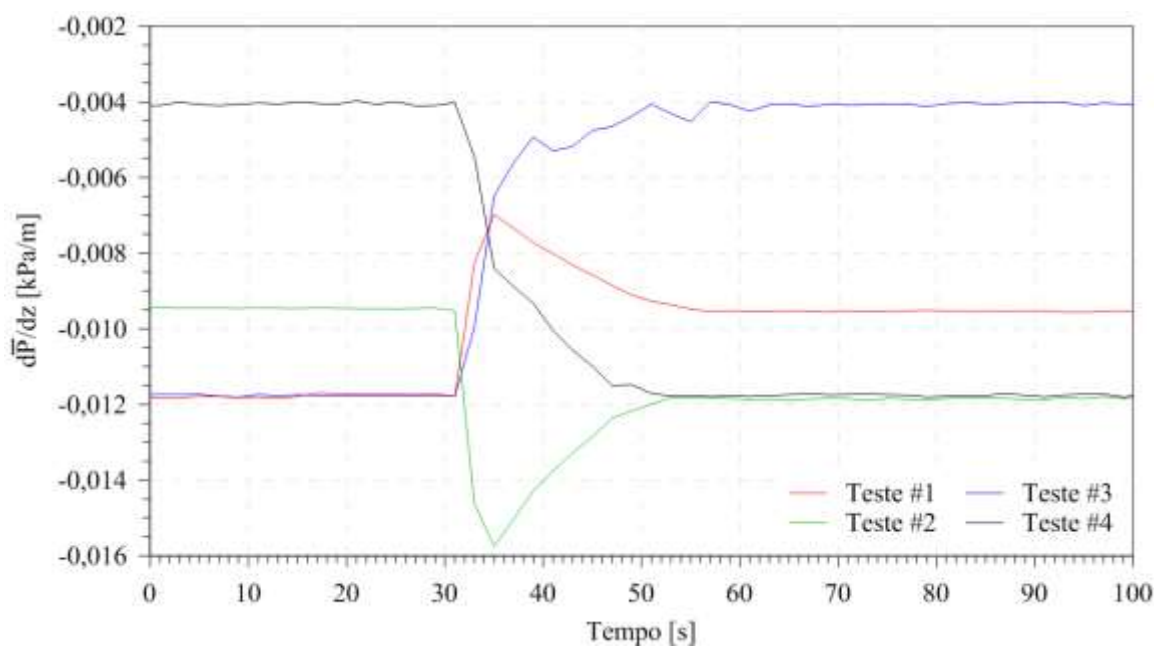


Figura 5.7. Gradientes médios de pressão para os quatro testes experimentais.

5.4 Propriedades Discretas: Parâmetros Geométricos e Cinemáticos

Os parâmetros geométricos e cinemáticos médios estão explicitados na primeira subseção. A segunda subseção mostra as funções densidade de probabilidade das propriedades discretas. A terceira subseção apresenta a evolução temporal dos parâmetros geométricos e cinemáticos.

5.4.1 Parâmetros Geométricos e Cinemáticos Médios na Seção de Teste

Os parâmetros geométricos e cinemáticos do escoamento intermitente não são constantes ao longo da seção de teste devido à interação entre as estruturas constituintes causada pelo efeito esteira, conforme retratado por Moissis e Griffith (1962) e observados nas Tabelas 5.3 à 5.6.

As propriedades discretas médias, juntamente com as respectivas incertezas absolutas nas quatro estações de medição para o teste #1 estão expostas na Tabela 5.3. As velocidades médias de translação do nariz da bolha alongada, os comprimentos adimensionais médios da bolha alongada e do pistão de líquido, o fator médio de intermitência e a frequência média de passagem de golfadas correspondem aos valores médios obtidos a partir das 100 aquisições para cada um dos quatro testes experimentais. Ressalta-se que a taxa média de coalescência indicada na linha correspondente à estação de medição 1 representa o valor estimado entre as estações de medição 1 e 2. A taxa média de coalescência entre as estações de medição 2 e 3 está exibida na segunda linha, enquanto a terceira linha apresenta a taxa média de coalescência entre as estações de medição 3 e 4.

Verifica-se que a diminuição da velocidade superficial da fase gasosa causa a redução da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional médio da bolha alongada e do fator médio de intermitência. O comprimento adimensional médio do pistão de líquido mantém-se praticamente inalterado e a frequência média de passagem de golfadas aumenta. Nota-se o acréscimo da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional médio da bolha alongada e do comprimento adimensional médio do pistão de líquido ao longo da seção de teste nos estados

inicial e final, ao passo que a frequência média de passagem de golfadas, o fator médio de intermitência e a taxa média de coalescência diminuem.

Tabela 5.3. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #1.

		Teste #1					
		\bar{u}_T [m/s]	\bar{L}_B/D [-]	\bar{L}_S/D [-]	$\bar{\beta}$ [-]	\bar{f} [Hz]	\bar{C} [%/m]
Estado Inicial	E1	1,37 ± 0,02	14,7 ± 0,7	6,4 ± 0,3	0,69 ± 0,05	2,67 ± 0,02	4,4 ± 0,1
	E2	1,38 ± 0,02	16,9 ± 0,8	8,6 ± 0,5	0,66 ± 0,04	2,24 ± 0,02	3,0 ± 0,1
	E3	1,41 ± 0,02	20,5 ± 1,0	11,1 ± 0,6	0,65 ± 0,04	1,85 ± 0,02	1,0 ± 0,1
	E4	1,43 ± 0,02	22,3 ± 1,1	12,5 ± 0,7	0,63 ± 0,04	1,70 ± 0,02	
Estado Final	E1	1,08 ± 0,02	9,2 ± 0,4	5,9 ± 0,3	0,60 ± 0,04	3,01 ± 0,03	4,2 ± 0,1
	E2	1,12 ± 0,02	10,6 ± 0,5	7,5 ± 0,4	0,59 ± 0,04	2,54 ± 0,02	3,2 ± 0,1
	E3	1,15 ± 0,02	10,7 ± 0,5	11,9 ± 0,6	0,47 ± 0,03	2,08 ± 0,02	1,1 ± 0,1
	E4	1,18 ± 0,02	11,5 ± 0,6	13,9 ± 0,8	0,45 ± 0,03	1,90 ± 0,02	

A Tabela 5.4 exibe as propriedades discretas médias e as respectivas incertezas absolutas do escoamento intermitente para as quatro estações de medição referentes ao teste #2. Constata-se que a elevação da velocidade superficial de gás ocasiona o aumento da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional médio da bolha alongada e do fator médio de intermitência, ao mesmo tempo em que o comprimento adimensional médio do pistão de líquido permanece aproximadamente constante e a frequência média de passagem de golfadas decresce. Nos estados inicial e final, observa-se o aumento da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional médio da bolha alongada e do comprimento adimensional médio do pistão de líquido ao longo da seção de teste, enquanto a frequência média de passagem de golfadas, o fator médio de intermitência e a taxa média de coalescência reduzem.

Nos transientes induzidos pela mudança da vazão volumétrica de gás, a velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento adimensional médio da bolha alongada e o fator médio de intermitência são proporcionais às variações da velocidade superficial da fase gasosa. A frequência média de passagem de golfadas é inversamente

proporcional às alterações da velocidade superficial de ar e o comprimento adimensional médio do pistão de líquido mantém-se praticamente constante em cada uma das estações de medição para os testes #1 e #2.

As propriedades discretas do estado inicial para o teste #1 são semelhantes aos parâmetros do estado final para o teste #2, ao mesmo tempo em que as propriedades discretas depois do período transiente para o teste #1 são similares aos parâmetros antes do período transiente para o teste #2, em concordância com as Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.4. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #2.

		Teste #2					
		\bar{u}_T [m/s]	\bar{L}_B/D [-]	\bar{L}_S/D [-]	$\bar{\beta}$ [-]	\bar{f} [Hz]	\bar{C} [%/m]
Estado Inicial	E1	1,09	9,1	5,5	0,61	3,26	5,6
		$\pm 0,02$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	$\pm 0,04$	$\pm 0,03$	$\pm 0,1$
	E2	1,11	9,8	7,4	0,57	2,61	3,4
		$\pm 0,02$	$\pm 0,5$	$\pm 0,4$	$\pm 0,04$	$\pm 0,02$	$\pm 0,1$
	E3	1,12	10,5	11,0	0,49	2,11	1,4
		$\pm 0,02$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,1$
	E4	1,14	11,2	13,2	0,46	1,88	
		$\pm 0,02$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	
Estado Final	E1	1,34	14,9	6,4	0,69	2,72	5,3
		$\pm 0,02$	$\pm 0,7$	$\pm 0,3$	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$	$\pm 0,1$
	E2	1,36	17,2	8,4	0,67	2,20	2,6
		$\pm 0,02$	$\pm 0,8$	$\pm 0,5$	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$	$\pm 0,1$
	E3	1,40	20,2	10,7	0,65	1,87	1,4
		$\pm 0,02$	$\pm 1,0$	$\pm 0,6$	$\pm 0,04$	$\pm 0,02$	$\pm 0,1$
	E4	1,42	22,2	12,8	0,63	1,66	
		$\pm 0,02$	$\pm 1,1$	$\pm 0,7$	$\pm 0,04$	$\pm 0,01$	

Os parâmetros geométricos e cinemáticos médios, bem como as respectivas incertezas absolutas nas quatro estações de medição para o teste #3 estão apresentados na Tabela 5.5. Percebe-se a diminuição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada e da frequência média de passagem de golfadas originadas pela redução da velocidade superficial da fase líquida, à medida que o comprimento adimensional médio da bolha alongada, o comprimento adimensional médio do pistão de líquido e o fator médio de intermitência aumentam. Constata-se que a velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento adimensional médio da bolha alongada e o comprimento adimensional médio do pistão de líquido exibem tendência de crescimento ao longo da seção de teste. Por outro

lado, a frequência média de passagem de golfadas, o fator médio de intermitência e a taxa média de coalescência demonstram tendência de decrescimento.

Tabela 5.5. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #3.

		Teste #3					
		\bar{u}_T [m/s]	\bar{L}_B/D [-]	\bar{L}_S/D [-]	$\bar{\beta}$ [-]	\bar{f} [Hz]	\bar{C} [%/m]
Estado Inicial	E1	1,37 ± 0,02	14,6 ± 0,7	6,5 ± 0,3	0,69 ± 0,05	2,67 ± 0,02	4,2 ± 0,1
	E2	1,38 ± 0,02	16,8 ± 0,8	8,3 ± 0,4	0,67 ± 0,05	2,26 ± 0,02	2,8 ± 0,1
	E3	1,40 ± 0,02	19,8 ± 0,9	10,6 ± 0,6	0,65 ± 0,04	1,89 ± 0,02	1,2 ± 0,1
	E4	1,42 ± 0,02	21,8 ± 1,0	12,0 ± 0,6	0,64 ± 0,04	1,71 ± 0,02	
Estado Final	E1	1,05 ± 0,02	41,6 ± 2,0	12,9 ± 0,7	0,75 ± 0,05	0,84 ± 0,01	3,6 ± 0,1
	E2	1,06 ± 0,02	45,2 ± 2,2	16,8 ± 0,9	0,71 ± 0,05	0,73 ± 0,01	3,4 ± 0,1
	E3	1,07 ± 0,02	54,5 ± 2,6	21,0 ± 1,1	0,70 ± 0,05	0,59 ± 0,01	1,3 ± 0,1
	E4	1,08 ± 0,02	58,3 ± 2,8	24,8 ± 1,3	0,69 ± 0,05	0,53 ± 0,01	

As propriedades discretas médias e as respectivas incertezas absolutas para as quatro estações de medição correspondentes ao teste #4 estão demonstradas na Tabela 5.6. Verifica-se que o aumento da velocidade superficial de líquido implica na elevação da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada e da frequência média de passagem de golfadas, enquanto o comprimento adimensional médio da bolha alongada, o comprimento adimensional médio do pistão de líquido e o fator médio de intermitência diminuem. Nota-se a tendência de crescimento da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional médio da bolha alongada e do comprimento adimensional médio do pistão de líquido ao longo da seção de teste nos estados inicial e final. Entretanto, a frequência média de passagem de golfadas, o fator médio de intermitência e a taxa média de coalescência apresentam tendência de decaimento.

Nos transientes causados pela alteração da vazão volumétrica de líquido, a velocidade média de translação do nariz da bolha alongada e a frequência média de passagem de golfadas são proporcionais às mudanças da velocidade superficial de água. O comprimento adimensional médio da bolha alongada, o comprimento adimensional médio do pistão de

líquido e o fator médio de intermitência são inversamente proporcionais às alterações da velocidade superficial de líquido.

Os parâmetros geométricos e cinemáticos médios antes do período transiente para o teste #3 são similares às propriedades discretas médias depois do período transiente para o teste #4, ao passo que as propriedades discretas médias do estado final para o teste #3 são semelhantes aos parâmetros médios do estado inicial para o teste #4, conforme retratado nas Tabelas 5.5 e 5.6. Ademais, as propriedades discretas médias encontradas no estado inicial para os testes #1 e #3 são similares aos parâmetros médios calculados no estado final para os testes #2 e #4, em concordância com as Tabelas 5.3 à 5.6. Portanto, constata-se que as mudanças simétricas das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa resultam em parâmetros geométricos e cinemáticos também simétricos, o que corrobora que o escoamento intermitente bifásico alcança as características finais quando a onda de fração de vazio sair completamente da seção de teste.

Tabela 5.6. Parâmetros geométricos e cinemáticos médios das quatro estações de medição para o teste #4.

		Teste #4					
		\bar{u}_T [m/s]	\bar{L}_B/D [-]	\bar{L}_S/D [-]	$\bar{\beta}$ [-]	\bar{f} [Hz]	\bar{C} [%/m]
Estado Inicial	E1	1,06 ± 0,02	42,3 ± 2,0	13,4 ± 0,7	0,74 ± 0,05	0,91 ± 0,01	4,5 ± 0,1
	E2	1,07 ± 0,02	47,7 ± 2,3	16,9 ± 0,9	0,71 ± 0,05	0,76 ± 0,01	2,5 ± 0,1
	E3	1,09 ± 0,02	55,1 ± 2,6	20,1 ± 1,1	0,70 ± 0,05	0,65 ± 0,01	2,0 ± 0,1
	E4	1,10 ± 0,02	61,0 ± 2,9	24,5 ± 1,3	0,69 ± 0,05	0,55 ± 0,01	
Estado Final	E1	1,37 ± 0,02	15,1 ± 0,7	6,5 ± 0,4	0,69 ± 0,05	2,75 ± 0,02	5,4 ± 0,1
	E2	1,38 ± 0,02	17,4 ± 0,8	8,5 ± 0,5	0,66 ± 0,05	2,22 ± 0,02	2,9 ± 0,1
	E3	1,40 ± 0,02	20,3 ± 1,0	10,8 ± 0,6	0,65 ± 0,04	1,85 ± 0,02	0,9 ± 0,1
	E4	1,42 ± 0,02	21,9 ± 1,1	12,1 ± 0,7	0,64 ± 0,04	1,71 ± 0,02	

O aumento da velocidade superficial de mistura e a expansão do gás implicam na elevação da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada para os quatro testes experimentais. O fator médio de intermitência e o comprimento adimensional médio da bolha alongada são proporcionais à razão entre as velocidades superficiais de gás e líquido para as

condições operacionais analisadas. O comprimento adimensional médio do pistão de líquido permanece praticamente inalterado em cada uma das estações de medição para os transientes gerados pela mudança da vazão volumétrica de ar devido à fraca dependência da velocidade superficial da fase gasosa.

A velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento adimensional médio da bolha alongada e o comprimento adimensional médio do pistão de líquido crescem ao longo da seção de teste nos estados inicial e final para os quatro testes experimentais. O aumento do comprimento adimensional médio da bolha alongada ocorre devido à coalescência de bolhas e à queda de pressão ao longo da seção de teste, enquanto o crescimento do comprimento adimensional médio do pistão de líquido deve-se à coalescência de bolhas e à transferência de líquido entre unidades consecutivas. Por outro lado, a frequência média de passagem de golfadas, o fator médio de intermitência e a taxa média de coalescência decrescem ao longo da seção de teste antes e depois do período transiente para os quatro testes experimentais.

5.4.2 Funções Densidade de Probabilidade dos Parâmetros Geométricos e Cinemáticos

Como o padrão intermitente não apresenta periodicidade temporal e espacial, os parâmetros geométricos e cinemáticos médios podem não representar satisfatoriamente as características do escoamento bifásico. A dispersão dos dados experimentais ocorre devido ao processo de formação de golfadas, no qual as bolhas alongadas e os pistões de líquido são gerados com comprimentos distintos e propagam-se com diferentes velocidades ao longo da seção de teste. Desse modo, as distribuições estatísticas proporcionam melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos, posto que as funções densidade de probabilidade revelam como as populações das propriedades estão distribuídas ao redor do respectivo valor médio, conforme revelam Nydal *et al.* (1992) e Ujang *et al.* (2006).

As funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para os testes #1 e #2 estão expostas, respectivamente, nas Figuras 5.8 e 5.9. Como os dois sensores de condutância de uma mesma estação de medição estão espaçados axialmente 112,5 mm entre si, o aparato experimental registra apenas bolhas alongadas com comprimentos superiores à distância entre as hastes metálicas, o que provoca o seccionamento sistemático do lado esquerdo das distribuições

estatísticas. Percebe-se que a alteração brusca da vazão volumétrica de gás implica na mudança das funções densidade de probabilidade nos estados inicial e final.

Os comprimentos adimensionais das bolhas alongadas aumentam ao longo da seção de teste devido à queda da pressão e à coalescência de bolhas, o que causa uma considerável diminuição da população de bolhas alongadas com comprimentos inferiores a $10 D$ e um significativo crescimento da população de bolhas alongadas maiores que $30 D$, especialmente na estação de medição 4 para os testes #1 e #2.

Os comprimentos adimensionais dos pistões de líquido aumentam devido à coalescência de bolhas e transferência de líquido entre as unidades, o que provoca a redução da população de pistões de líquido com comprimentos menores que $4 D$ e o aumento da população de pistões de líquido maiores que $14 D$ ao longo das estações de medição para os testes #1 e #2.

Observa-se que a dispersão da velocidade de translação do nariz da bolha alongada é inversamente proporcional à velocidade superficial de gás e diminui ao longo da seção de teste nos estados inicial e final para os transientes induzidos pela alteração da fase gasosa. A dispersão do comprimento adimensional da bolha alongada é proporcional à velocidade superficial da fase gasosa. A mudança súbita da velocidade superficial da fase gasosa não influencia significativamente as distribuições estatísticas do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas. As dispersões do comprimento adimensional da bolha alongada e do comprimento adimensional do pistão de líquido aumentam ao longo da seção de teste. A variância da frequência de passagem de golfadas reduz progressivamente, enquanto o segundo momento estatístico do fator de intermitência permanece praticamente inalterado.

Verificam-se as semelhanças entre as distribuições estatísticas do estado inicial para o teste #1 e as funções densidade de probabilidade do estado final para o teste #2. Adicionalmente, as distribuições estatísticas pertencentes ao estado final do teste #1 apresentam similaridades com as funções densidade de probabilidade referentes ao estado inicial do teste #2.

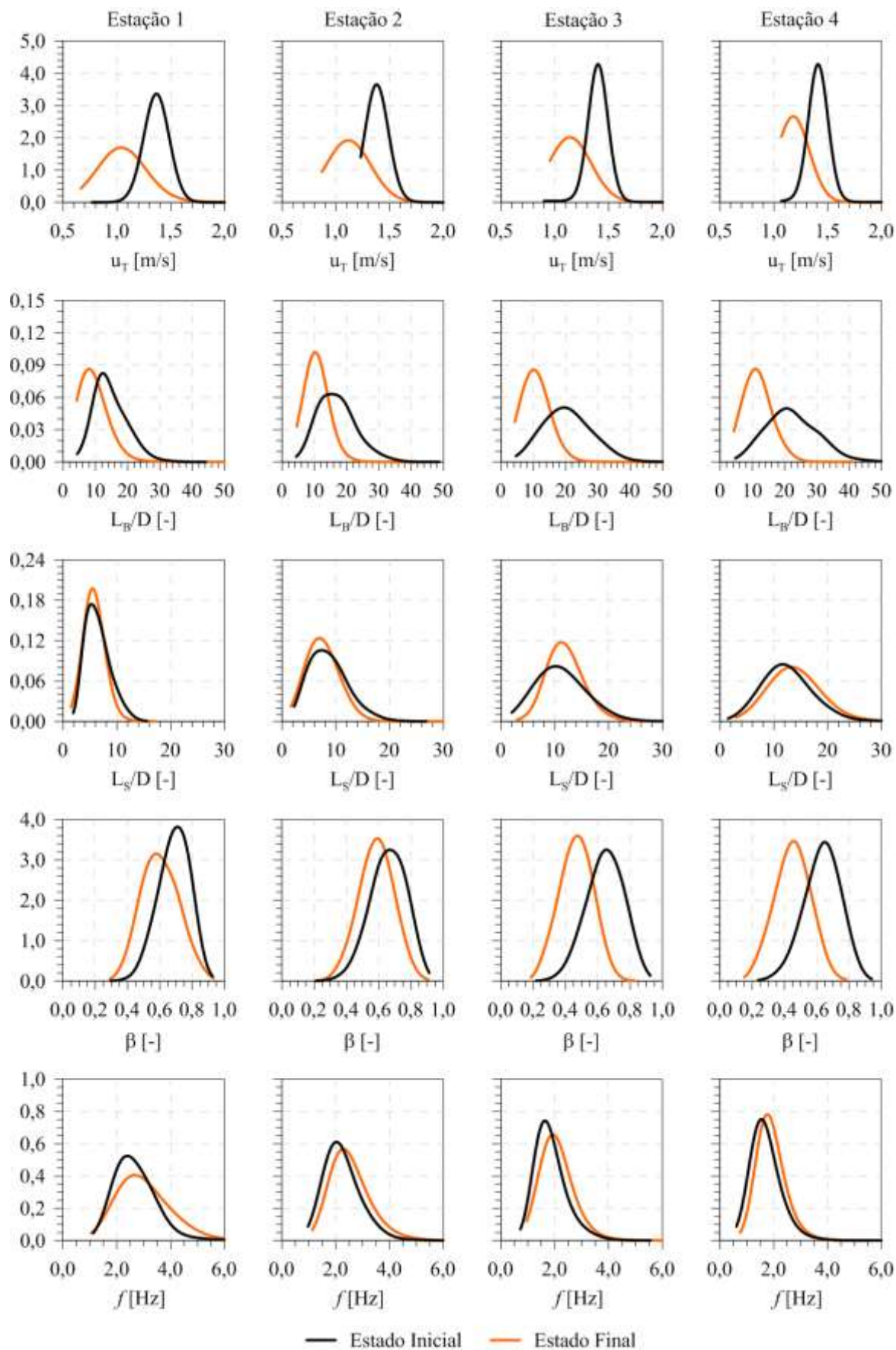


Figura 5.8. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #1.

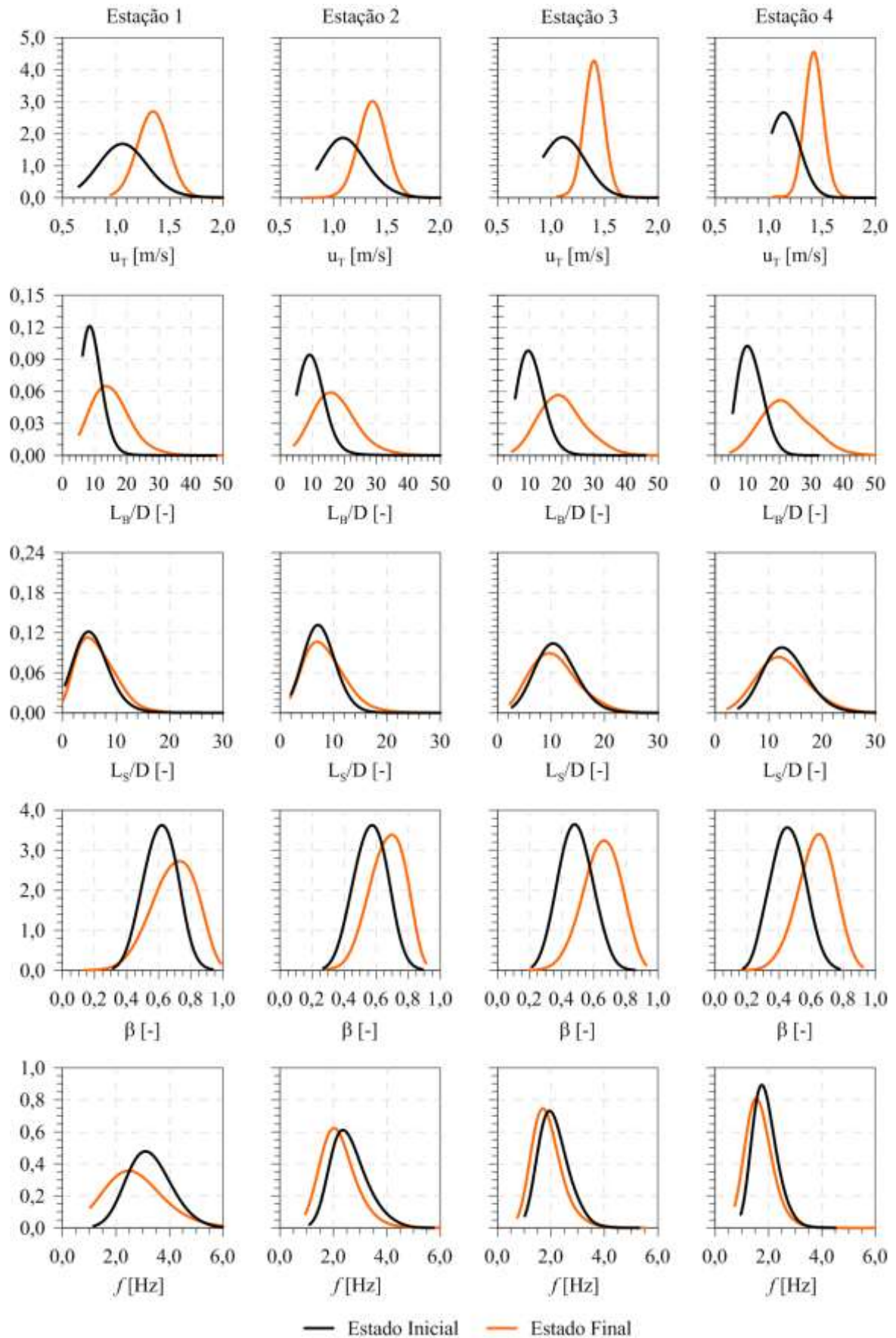


Figura 5.9. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #2.

As Figuras 5.10 e 5.11 demonstram, respectivamente, as funções densidade de probabilidade das propriedades contínuas nos estados inicial e final das quatro estações de medição para os testes #3 e #4. Similarmente às Figuras 5.8 e 5.9, percebe-se que o espaçamento entre as hastes metálicas dos sensores de condutância provocam o seccionamento sistemático do lado esquerdo das distribuições estatísticas. Nota-se que a variação súbita da vazão volumétrica de líquido causa alterações significativas nas funções densidade de probabilidade dos estados inicial e final.

A queda de pressão e a coalescência de bolhas na seção de teste causam a significativa redução da população de bolhas alongadas com comprimentos menores que 10 D nos estados inicial e final para os testes #3 e #4. Observa-se o incremento da população de bolhas alongadas maiores que 30 D e 70 D, respectivamente, nos estados inicial e final para o teste #3. Complementarmente, verifica-se o aumento da população de bolhas alongadas superiores a 70 D e 30 D, respectivamente, nos estados inicial e final para o teste #4.

A coalescência de bolhas e a transferência de líquido entre unidades consecutivas implicam na diminuição da população de pistões de líquido com comprimentos inferiores a 5 D antes e depois do período transiente para os testes #3 e #4. Nota-se o aumento da população de pistões de líquido maiores que 15 D e 30 D, respectivamente, nos estados inicial e final para o teste #3. Adicionalmente, percebe-se o crescimento da população de pistões de líquido superiores a 30 D e 15 D, respectivamente, nos estados inicial e final para o teste #4.

O segundo momento estatístico da velocidade de translação do nariz da bolha alongada e da frequência de passagem de golfadas são proporcionais à velocidade superficial da fase líquida, enquanto as dispersões do comprimento adimensional da bolha alongada e do comprimento adimensional do pistão de líquido são inversamente proporcionais à velocidade superficial de água. A distribuição estatística do fator de intermitência não exhibe mudanças significativas devido à variação da velocidade superficial de líquido e mantém-se aproximadamente constante ao longo da seção de teste. As variâncias da velocidade de translação do nariz da bolha alongada e da frequência de passagem de golfadas reduzem ao longo da seção de teste nos estados inicial e final. As dispersões do comprimento adimensional da bolha alongada e do comprimento adimensional do pistão de líquido crescem com a distância axial da seção de teste.

Constatam-se as similaridades entre as funções densidade de probabilidade antes do período transiente para o teste #3 e as distribuições estatísticas depois do período transiente para o teste #4. Complementarmente, as distribuições estatísticas referentes ao estado final do teste #3 também exibem semelhanças em relação às funções densidade de probabilidade

correspondentes ao estado inicial do teste #4. Além disso, observam-se as similaridades entre as distribuições estatísticas do estado inicial para os testes #1 e #3 e do estado final para os testes #2 e #4, visto que as velocidades superficiais de gás e líquido são praticamente iguais para as quatro estações de medição, em concordância com a Tabela 5.1. As semelhanças das funções densidade de probabilidade entre os estados inicial e final dos quatro testes experimentais enfatizam que o escoamento intermitente adquire as características do estado final, uma vez que a onda de fração de vazio egressa a seção de teste.

Observa-se que a dispersão da velocidade de translação do nariz da bolha alongada é inversamente proporcional à razão entre as velocidades superficiais de gás e líquido, enquanto a variância do comprimento adimensional da bolha alongada é proporcional à razão entre as velocidades superficiais das fases gasosa e líquida.

As dispersões da velocidade de translação do nariz da bolha alongada e da frequência de passagem de golfadas diminuem ao longo da seção de teste para os quatro testes experimentais. Por outro lado, as variâncias do comprimento adimensional da bolha alongada e do comprimento adimensional do pistão de líquido aumentam ao longo da seção de teste para as condições operacionais estudadas. A distribuição estatística do fator de intermitência permanece sensivelmente inalterada ao longo da seção de teste para os quatro testes experimentais.

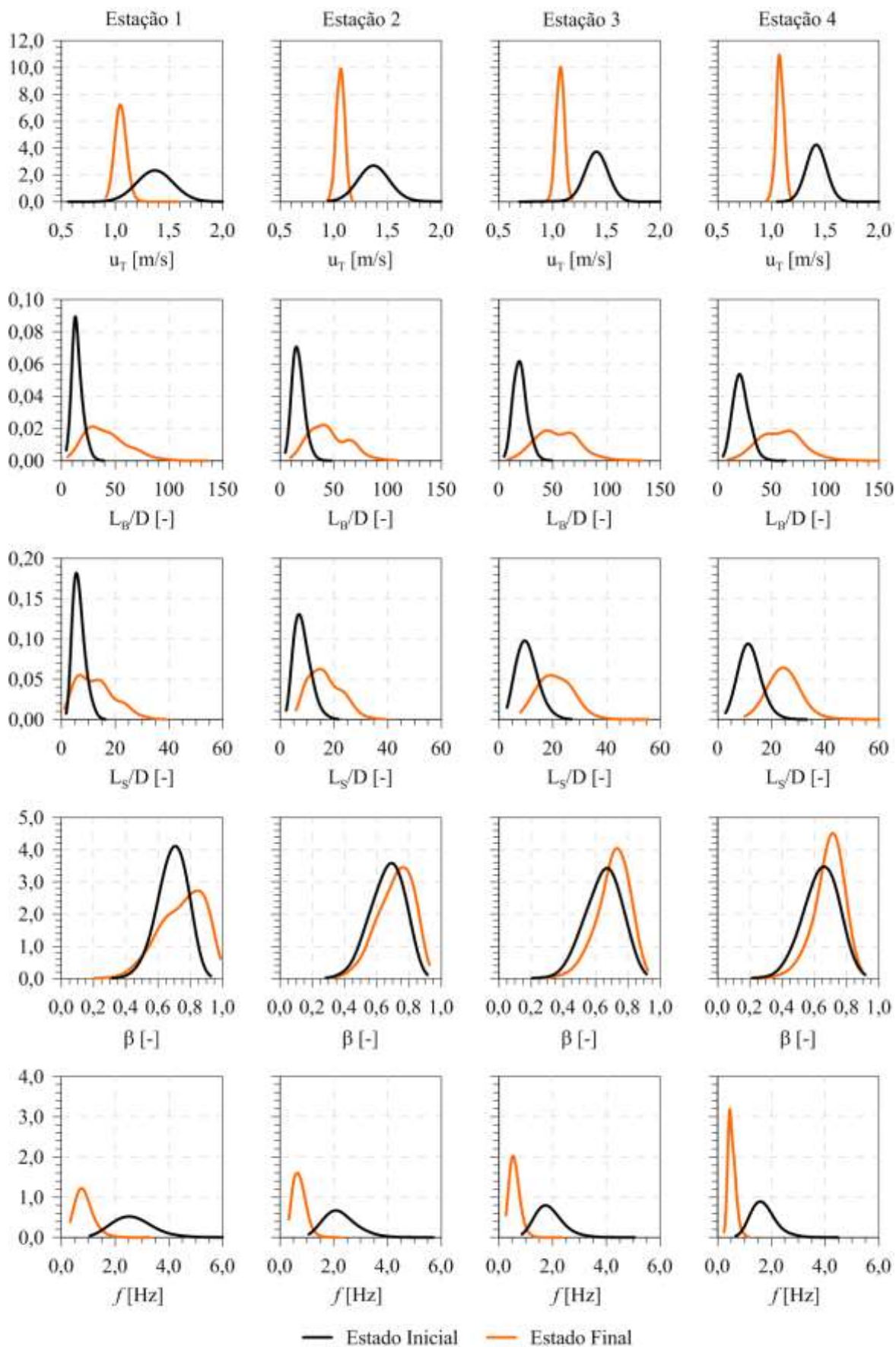


Figura 5.10. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #3.

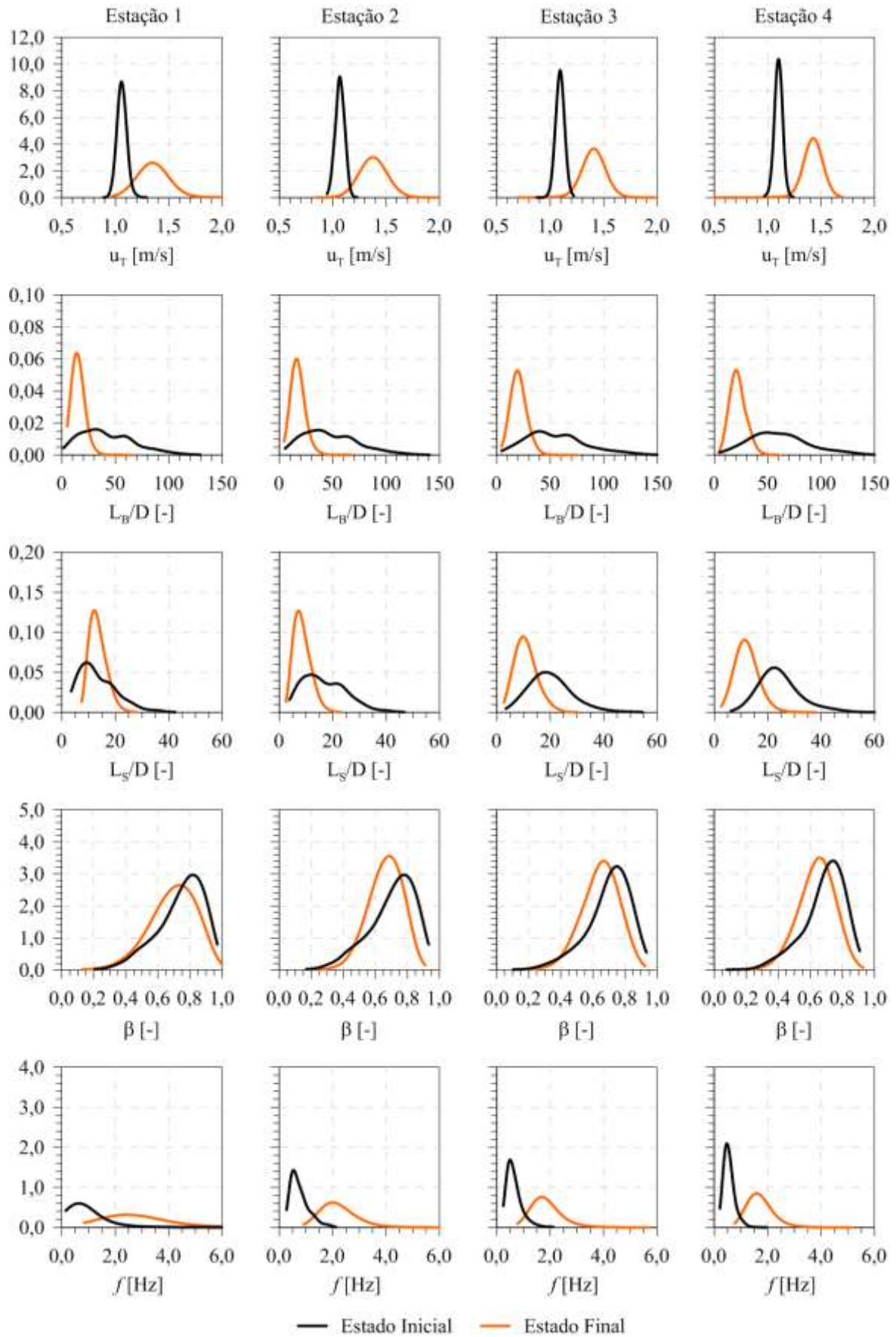


Figura 5.11. Funções densidade de probabilidade dos parâmetros geométricos e cinemáticos nos estados inicial e final das quatro estações de medição para o teste #4.

5.4.3 Evolução Temporal dos Parâmetros Geométricos e Cinemáticos

As linhas de tendência geradas a partir da média móvel centrada de 31 pontos aplicadas aos parâmetros geométricos e cinemáticos permitem a avaliação do comportamento temporal das propriedades discretas de maneira contínua nas quatro estações de medição, conforme exemplificado na Seção 4.2.

As linhas de tendência dos parâmetros geométricos e cinemáticos para as quatro estações de medição referentes ao teste #1 estão expostas na Figura 5.12. A evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional da bolha alongada e do comprimento adimensional do pistão de líquido estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 5.12a-c, ao passo que o fator de intermitência e a frequência de passagem de golfadas são demonstrados, respectivamente, nas Figuras 5.12d-e. Percebe-se que todas as propriedades discretas do escoamento intermitente exibem patamares aproximadamente constantes antes e depois do período transiente e as oscilações observadas ocorrem devido à aleatoriedade intrínseca do padrão golfadas. A redução brusca da velocidade superficial da fase gasosa causa uma variação íngreme e praticamente instantânea na velocidade de translação do nariz da bolha alongada em toda extensão da seção de teste. Os perfis do comprimento adimensional da bolha alongada apresentam um aumento gradual após a redução brusca da vazão volumétrica de gás seguido de uma queda acentuada até alcançar o estado final. O acréscimo do comprimento adimensional da bolha alongada antes da variação brusca deve-se à queda de pressão e à compressibilidade da mistura bifásica. Os sinais do comprimento adimensional do pistão de líquido revelam variações gradativas entre os estados inicial e final. Os sinais do fator de intermitência exibem mudanças súbitas, enquanto os sinais da frequência de passagem de golfadas apresentam decaimento progressivo acompanhado de uma recuperação até atingir o estado final. Os perfis do fator de intermitência são similares aos sinais médios de fração de vazio expostos na Figura 5.3b.

Observa-se que os intervalos de tempo entre as variações da velocidade de translação do nariz da bolha alongada ocorridas nas quatro estações de medição são consideravelmente menores que os intervalos de tempo entre as alterações do comprimento adimensional da bolha alongada, do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas, o que indica que a mudança da velocidade de translação do nariz da bolha alongada desloca-se com velocidade superior as demais propriedades discretas.

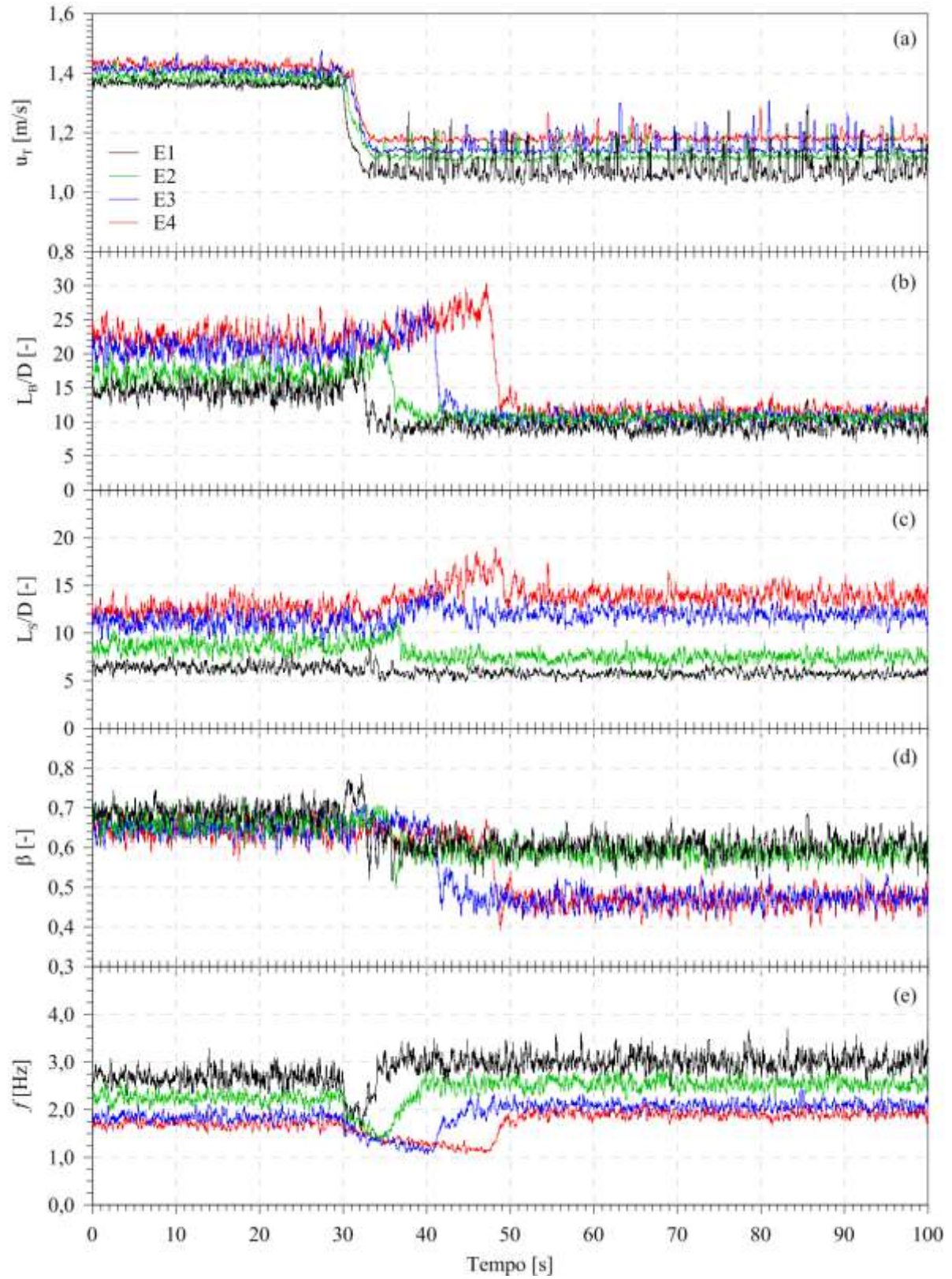


Figura 5.12. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #1.

A Figura 5.13 demonstra a evolução temporal dos parâmetros geométricos e cinemáticos das quatro estações de medição para o teste #2. Verifica-se que todos os parâmetros geométricos e cinemáticos analisados exibem valores sensivelmente constantes antes e depois do período transiente. A elevação da velocidade superficial de gás implica em uma variação íngreme e praticamente simultânea da velocidade de translação da bolha alongada nas quatro estações de medição. Os sinais do comprimento adimensional da bolha alongada apresentam saltos, enquanto os sinais do comprimento adimensional do pistão de líquido exibem mudanças pontuais entre os estados inicial e final. O fator de intermitência revela alterações bruscas entre os patamares e a frequência de passagem de golfadas demonstra um aumento momentâneo acompanhado de uma queda até alcançar o estado final. A evolução temporal do fator de intermitência mostra similaridades com os perfis médios de fração de vazio expostos na Figura 5.4b.

Nota-se que a variação da velocidade de translação do nariz da bolha alongada desloca-se mais rapidamente do que as alterações dos outros parâmetros geométricos e cinemáticos. Apesar dos parâmetros geométricos e cinemáticos médios dos estados inicial e final serem simétricos para os testes #1 e #2, conforme exibido nas Tabelas 5.3 e 5.4, percebem-se comportamentos distintos das linhas de tendência do comprimento adimensional da bolha alongada, do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas durante o período transiente, o que sugere diferentes processos de formação de golfadas.

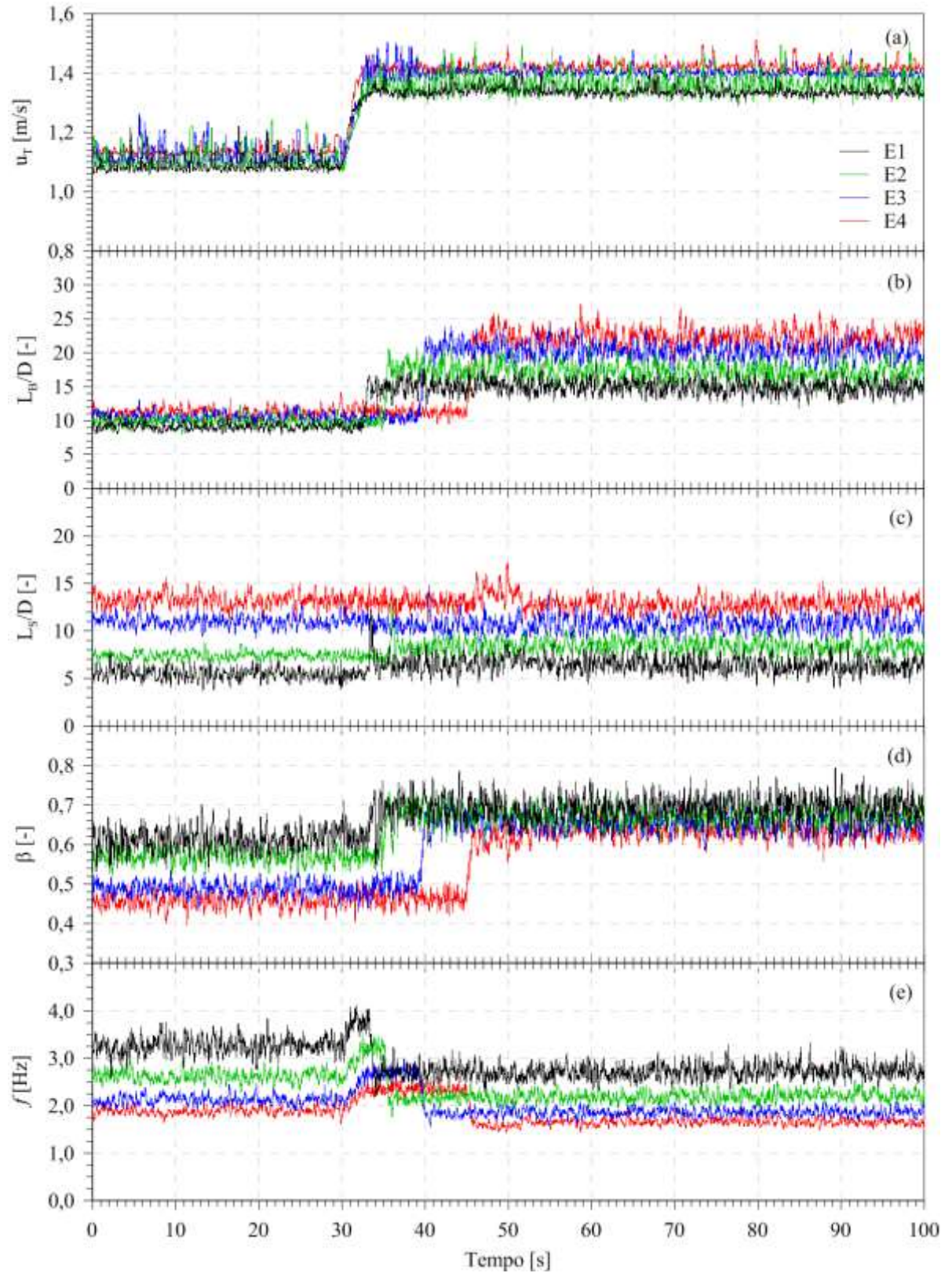


Figura 5.13. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #2.

As linhas de tendência da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento adimensional da bolha alongada, do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas pertencentes às quatro estações de medição para o teste #3 estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 5.14a-e. Constata-se que todos os parâmetros geométricos e cinemáticos exibem regiões aproximadamente constantes antes e depois do período transiente. A redução da velocidade superficial de líquido gera uma variação brusca e praticamente instantânea da velocidade de translação do nariz da bolha alongada nas quatro estações de medição. Os sinais do comprimento adimensional da bolha alongada revelam picos com valores próximos de 150 D seguidos de oscilações, enquanto os sinais do comprimento adimensional do pistão de líquido exibem picos com valores entre 35 D e 50 D acompanhados de oscilações até a obtenção do estado final. Observa-se que os comprimentos máximos da bolha alongada coincidem com os valores máximos dos perfis médios da fração de vazio exibidos na Figura 5.5b. De forma análoga, os comprimentos máximos do pistão de líquido estão sincronizados com os valores mínimos dos perfis médios da fração de vazio, consoante à Figura 5.5b. O fator de intermitência demonstra uma variação brusca e a ocorrência do valor máximo da evolução temporal. Em seguida, os sinais do fator de intermitência adquirem o valor mínimo e oscilam até atingirem o patamar correspondente ao estado final. Os perfis do fator de intermitência apresentam semelhanças com os sinais médios da fração de vazio apresentados na Figura 5.5b. A frequência de passagem de golfadas mostra decaimento gradual acompanhado por uma variação brusca e flutuações até a estabilização final.

Nota-se que a redução brusca da vazão volumétrica da fase gasosa no teste #1 causa o aumento progressivo do comprimento adimensional da bolha alongada antes da chegada da onda de fração de vazio, consoante ao observado na Figura 5.12. De maneira semelhante, a diminuição abrupta da vazão volumétrica da fase líquida no teste #3 implica no surgimento de uma bolha alongada incomum seguida por bolhas alongadas de menores comprimentos, conforme a Figura 5.14. Essas evidências experimentais revelam características singulares da evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada nos testes experimentais definidos por uma onda de expansão.

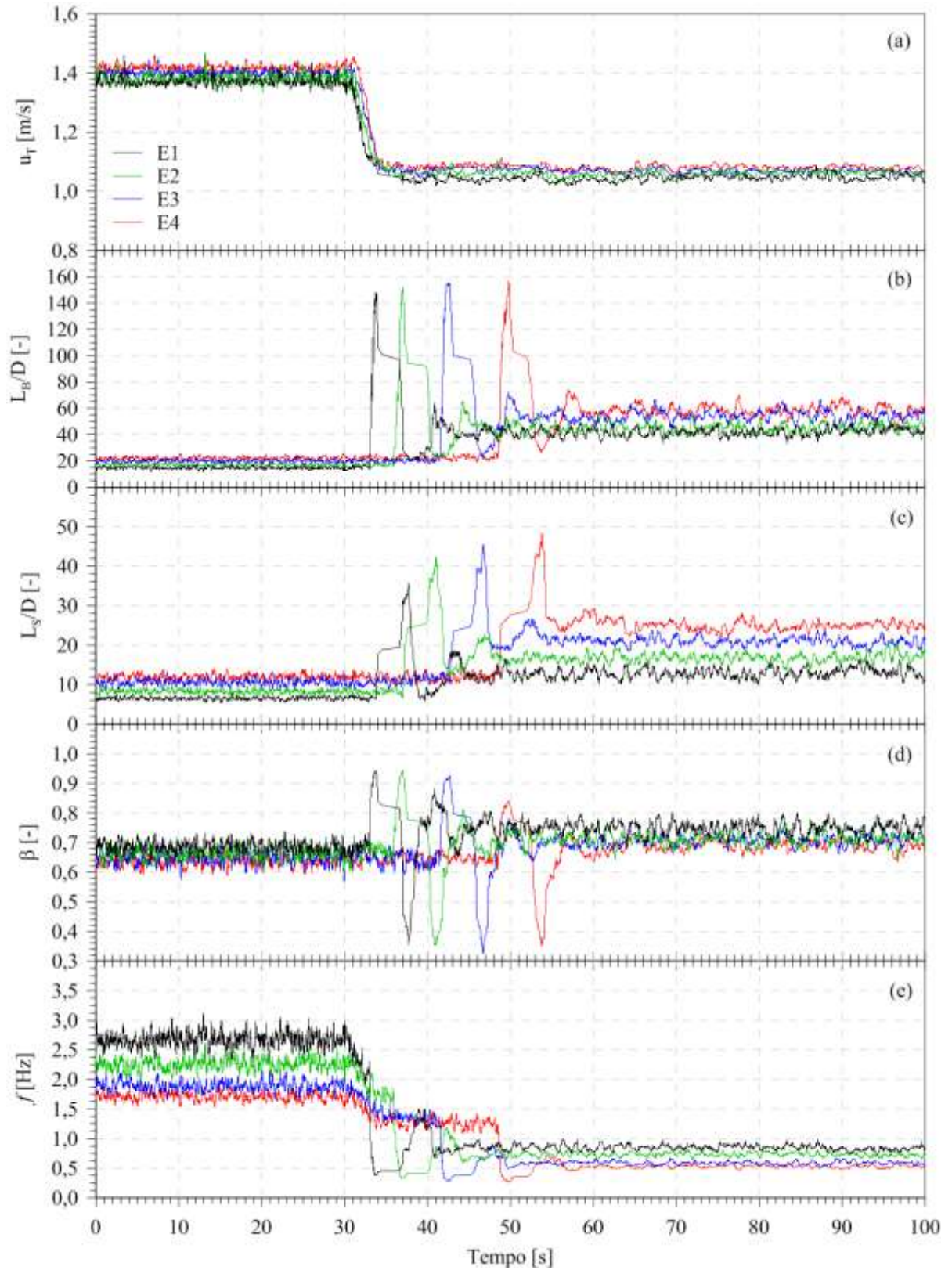


Figura 5.14. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #3.

Como os intervalos de tempos entre as alterações bruscas da velocidade de translação do nariz da bolha alongada são significativamente menores que os intervalos de tempo expostos pelas demais propriedades discretas, verifica-se que a variação da velocidade de translação do nariz da bolha alongada move-se mais rapidamente que as mudanças apresentadas pelos outros parâmetros.

A evolução temporal das propriedades discretas das quatro estações de medição correspondentes ao teste #4 estão exibidas na Figura 5.15. Todos os parâmetros geométricos e cinemáticos apresentam regiões com valores sensivelmente constantes antes e depois do período transiente. Percebe-se que o acréscimo da velocidade superficial da fase líquida causa uma variação abrupta e praticamente instantânea da velocidade de translação do nariz da bolha alongada em toda extensão da seção de teste. O comprimento adimensional da bolha alongada apresenta uma queda seguida por oscilações, ao passo que o comprimento adimensional do pistão de líquido revela um aumento pontual seguido por uma variação abrupta e oscilações até a obtenção do estado final. Observa-se que os comprimentos máximos do pistão de líquido coincidem com os valores mínimos dos perfis médios da fração de vazio expostos na Figura 5.6b. Os perfis do fator de intermitência apresentam uma mudança acentuada e a ocorrência do valor mínimo. Em seguida, os sinais do fator de intermitência oscilam e alcançam o patamar referente ao estado final. O fator de intermitência exibe comportamento semelhante à fração de vazio, em concordância com a Figura 5.6b. A frequência de passagem de golfadas mostra uma elevação progressiva acompanhada do salto para a região pertencente ao estado final.

Verifica-se que a maior velocidade de deslocamento ocorre nos sinais da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, enquanto o comprimento adimensional da bolha alongada, o comprimento adimensional do pistão de líquido, o fator de intermitência e a frequência de passagem de golfadas possuem velocidades consideravelmente menores. Os parâmetros geométricos e cinemáticos médios dos estados inicial e final são simétricos para os testes #3 e #4, consoante às Tabelas 5.5 e 5.6. Entretanto, as linhas de tendência do comprimento adimensional da bolha alongada, do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas para os testes #3 e #4 mostram diferentes comportamentos durante o período transiente, o que sinaliza distintos processos de formação de golfadas.

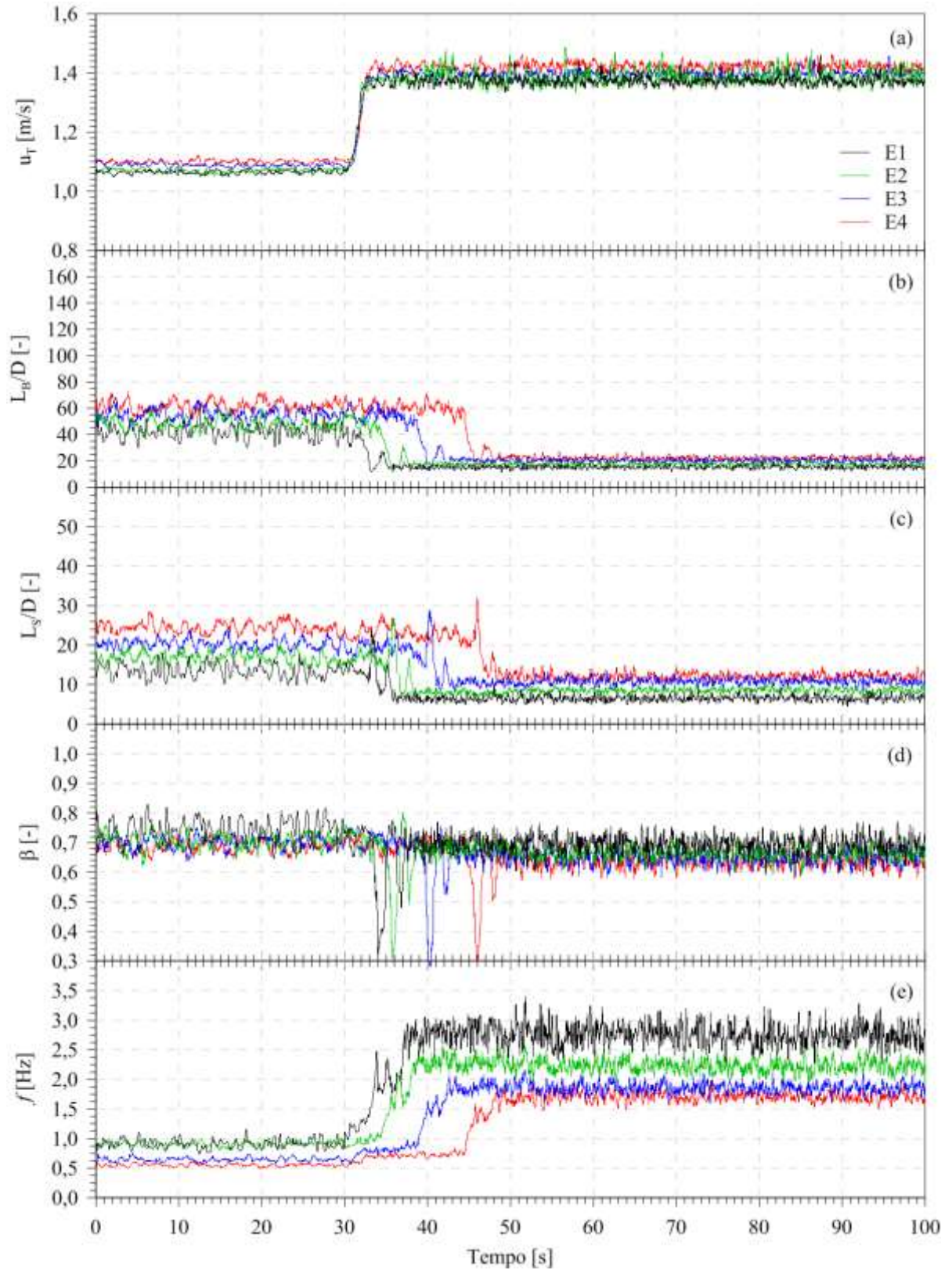


Figura 5.15. (a) Evolução temporal da velocidade de translação do nariz da bolha alongada; (b) evolução temporal do comprimento adimensional da bolha alongada; (c) evolução temporal do comprimento adimensional do pistão de líquido; (d) evolução temporal do fator de intermitência e (e) evolução temporal da frequência de passagem de golfadas das quatro estações de medição para o teste #4.

Verifica-se que os sinais da velocidade de translação do nariz da bolha alongada são semelhantes para os testes experimentais com aumento da velocidade superficial de mistura, testes #2 e #4. Complementarmente, os perfis da velocidade de translação do nariz da bolha alongada são similares para os testes experimentais com redução da velocidade superficial de mistura, testes #1 e #3. Os sinais da velocidade de translação do nariz da bolha alongada são perfis praticamente antissimétricos nos transientes causados pela mudança da vazão volumétrica de gás, testes #1 e #2, o que se repete nos transientes induzidos pela alteração da vazão volumétrica de líquido, testes #3 e #4.

Nota-se que os perfis do fator de intermitência são semelhantes aos sinais médios da fração de vazio para os quatro testes experimentais, principalmente para os transientes gerados pela mudança na vazão volumétrica de líquido. Os perfis do comprimento adimensional da bolha alongada, do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas são significativamente distintos para os quatro testes experimentais.

A variação da velocidade de translação do nariz da bolha alongada ocorre de forma praticamente instantânea nas quatro estações de medição e desloca-se com velocidade similar à onda de pressão para os quatro testes experimentais. Por outro lado, as variações do comprimento adimensional da bolha alongada, do comprimento adimensional do pistão de líquido, do fator de intermitência e da frequência de passagem de golfadas são transmitidas ao longo da seção de teste com velocidades similares à onda de fração de vazio.

5.5 Análise Mecanicista

Para explicar a evolução temporal das ondas de fração de vazio e de pressão, sugere-se a análise mecanicista abordando a velocidade de translação do nariz da bolha alongada, o comprimento da bolha alongada e o comprimento do pistão de líquido.

Assim que a mudança da velocidade superficial de mistura é introduzida, a velocidade de translação do nariz da bolha alongada também é modificada ao longo da seção de teste com velocidade similar à onda de pressão. Entre 1,0 s e 1,4 s após o período transiente iniciar, o escoamento é caracterizado pela velocidade de translação do nariz da bolha alongada correspondente ao estado final, enquanto o comprimento da bolha alongada e o comprimento do pistão de líquido preservam as características do estado inicial. A mudança abrupta da

velocidade de translação do nariz da bolha alongada causa a variação brusca da pressão. As alterações do comprimento da bolha alongada e do comprimento do pistão de líquido deslocam-se com velocidade similar à onda de fração de vazio. A onda de fração de vazio é alterada devido à chegada das bolhas alongadas e dos pistões de líquido com as propriedades do estado final. Por consequência, as mudanças dos comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido provocam variações nos sinais médios da pressão. Os perfis médios de pressão iniciam a recuperação gradual nos transientes provocados pela mudança da fase gasosa e a aproximação irregular nos transientes induzidos pela alteração da fase líquida. A estabilização final dos perfis médios de pressão ocorrem após a onda de fração de vazio sair totalmente da seção de teste.

As diferenças dos perfis médios de fração de vazio e de pressão expostas nas Figuras 5.3 a 5.6 podem ser explicadas pelo processo de formação de golfadas. A fase líquida escoava paralelamente à fase gasosa na entrada da seção de teste. O gás transfere energia para o filme de líquido através da diferença de pressão e da tensão de cisalhamento na interface dos fluidos de teste. As perturbações interfaciais aumentam até alcançarem toda seção transversal da tubulação e enclausurarem pequenas porções de gás. Com o desenvolvimento do escoamento, as pequenas porções de gás aprisionadas pelas instabilidades hidrodinâmicas podem evoluir para o escoamento no padrão intermitente, conforme descrito por Ujang *et al.* (2006).

A inspeção visual próxima do injetor de correntes paralelas mostra que a espessura do filme de líquido na entrada da seção de teste permanece sensivelmente inalterada e as perturbações na interface gás-líquido são qualitativamente similares nos transientes com mudança da fase gasosa, testes #1 e #2. A mudança repentina da velocidade superficial da fase gasosa na entrada da seção de teste origina a formação de uma bolha alongada com as propriedades do estado final. Para o teste com diminuição súbita da fase gasosa, o comprimento médio da bolha alongada é de aproximadamente 15 D na estação de medição 1, enquanto o comprimento médio da bolha alongada é de 9 D para o teste com aumento brusco da fase gasosa. Os *undershoots* observados no teste #1 e os *overshoots* registrados no teste #2 são resultados da compressibilidade da mistura bifásica devido à alteração súbita da velocidade superficial da fase gasosa. Consideram-se os *undershoots* e os *overshoots* como efeitos transientes do processo de formação de golfadas.

Os períodos transientes dos testes experimentais com variação da velocidade superficial de líquido apresentam comportamentos significativamente distintos em comparação com os testes experimentais com mudança da velocidade superficial de gás. O comprimento médio da bolha alongada na estação de medição 1 é de aproximadamente 15 D

para o teste #3 e de praticamente 42 D para o teste #4. Entretanto, a maior diferença entre os testes experimentais com mudança das fases líquida e gasosa refere-se ao surgimento de uma bolha alongada e de um pistão de líquido com comprimentos incomuns. Verifica-se a formação de uma bolha alongada com aproximadamente 150 D seguida por um pistão de líquido de praticamente 40 D para o teste #3, consoante à Figura 5.14. Adicionalmente, nota-se a ocorrência de um pistão de líquido com aproximadamente 30 D para o teste #4, porém as bolhas alongadas não exibem comprimentos atípicos, em concordância com a Figura 5.15.

Para o teste #3, a inspeção visual próxima do injetor de correntes paralelas revela uma redução instantânea da espessura do filme de líquido na entrada da seção de teste devido à redução súbita da velocidade superficial de água. A diminuição momentânea da espessura do filme de líquido modifica a transferência de energia entre a interface gás-líquido e retarda o aparecimento das instabilidades hidrodinâmicas responsáveis pela formação das golfadas, o que implica no surgimento de uma bolha alongada incomum seguida por um pistão de líquido atípico. Considera-se esse fenômeno como um efeito transiente no processo de formação das unidades constituintes do escoamento intermitente. Uma vez que os efeitos transientes encerram-se, as propriedades discretas retornam às características do estado final.

Percebe-se que o acréscimo repentino da velocidade superficial da fase líquida causa o aumento instantâneo da espessura do filme de líquido próximo do injetor de correntes paralelas e a formação de um pistão de líquido de aproximadamente 32 D. Contrariamente ao observado no teste #3, a formação de uma bolha alongada atípica não é registrada para o teste #4. Justifica-se o aparecimento desse pistão de líquido singular como um efeito transiente na interface gás-líquido durante o processo de formação de golfadas.

Portanto, constata-se que os perfis médios de pressão para os testes #3 e #4 não apresentam a ocorrência de *undershoot* e *overshoot* devido à existência de um pistão de líquido com comprimento incomum. A alteração da velocidade superficial da fase líquida motiva a mudança brusca da pressão acompanhada pela aproximação irregular até a estabilização final. Ademais, as oscilações dos perfis médios de pressão durante o período transiente estão em sincronia com as flutuações dos sinais médios de fração de vazio, conforme exibido nas Figuras 5.3 a 5.6.

5.6 Onda de Fração de Vazio e Onda de Pressão: Velocidades Experimentais

Os sinais médios de fração de vazio das quatro estações de medição exibidos nas Figuras 5.3b a 5.6b possibilitam a estimativa da velocidade de propagação da onda de fração de vazio através da relação entre a distância de duas estações de medição e o tempo gasto no deslocamento, conforme descrito na Seção 4.1. De modo semelhante, os sinais médios de pressão expostos nas Figuras 5.3c a 5.6c das quatro estações de medição permitem a avaliação da velocidade de propagação da onda de pressão através da relação entre o espaçamento de duas estações de medição e o intervalo de tempo necessário para efetuar o percurso, em concordância com a Seção 4.1.

As velocidades da onda de fração de vazio e da onda de pressão calculadas experimentalmente, juntamente com as respectivas incertezas absolutas para seis posições axiais da seção de teste estão expostas na Tabela 5.7. As distâncias entre o injetor de correntes paralelas e o ponto médio entre as duas estações de medição correspondentes são apresentadas na segunda coluna.

Observa-se que as velocidades da onda de fração de vazio permanecem praticamente constantes ao longo da seção de teste, conforme relatado por Fabre *et al.* (1995). Os testes experimentais caracterizados por uma onda de compressão, testes #2 e #4, apresentam velocidades da onda de fração de vazio maiores que os testes experimentais definidos por uma onda de expansão, testes #1 e #3. Além disso, as velocidades da onda de fração de vazio para os testes experimentais com redução da vazão volumétrica de gás e com diminuição da vazão volumétrica de líquido são praticamente iguais a 1,16 m/s. De modo semelhante, as velocidades da onda de fração de vazio para os testes experimentais com elevação da vazão volumétrica de ar e com aumento da vazão volumétrica de líquido são aproximadamente iguais a 1,45 m/s, o que sinaliza que a velocidade da onda de fração de vazio depende unicamente da velocidade superficial de mistura do estado final.

Observa-se que o estado final dos testes #1 e #3 apresentam velocidades superficiais de ar e água distintas, conforme exposto na Tabela 5.1, porém a velocidade superficial de mistura permanece aproximadamente inalterada, 0,90 m/s, e a velocidade de propagação da onda de fração de vazio mantém-se praticamente constante, 1,16 m/s. Complementarmente, os testes #2 e #4 exibem velocidades superficiais das fases líquida e gasosa semelhantes, consoante à Tabela 5.1, enquanto a velocidade superficial de mistura e a velocidade da onda de fração de vazio permanecem praticamente constantes e iguais a, respectivamente, 1,20 m/s e 1,45 m/s.

As velocidades de propagação da onda de pressão variam entre 18,1 m/s e 26,5 m/s para os quatro testes experimentais. A onda de pressão exibe uma tendência de desaceleração ao longo das estações de medição e as velocidades experimentais da onda de pressão demonstram maior dispersão em relação às velocidades experimentais da onda de fração de vazio. A velocidade média da onda de pressão para o teste com redução da fase gasosa, teste #1, é menor do que a velocidade média encontrada para o teste com aumento da fase gasosa, teste #2. Analogamente, a velocidade média da onda de pressão para o teste com diminuição da fase líquida, teste #3, é inferior à velocidade média calculada para o teste com elevação da fase líquida, teste #4. Verifica-se ainda que as velocidades da onda de pressão estimadas para os testes com mudança da fase gasosa são maiores do que as velocidades determinadas para os testes com alteração da fase líquida.

Portanto, percebe-se que o teste com redução da vazão volumétrica de gás, teste #1, exibe velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão menores que o teste com elevação da vazão volumétrica de ar, teste #2. Adicionalmente, o teste com diminuição da vazão volumétrica de líquido, teste #3, apresenta velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão menores que o teste com acréscimo da vazão volumétrica de água, teste #4.

As velocidades da onda de pressão são significativamente maiores que as velocidades da onda de fração de vazio. A razão entre a velocidade da onda de pressão e a velocidade da onda de fração de vazio nas quatro estações de medição mantém-se entre 16:1 e 21:1 para os testes experimentais com variação da fase gasosa, enquanto esta relação permanece entre 14:1 e 16:1 para os testes com mudança da fase líquida. Nota-se que a onda de pressão exibe velocidades distintas para os quatro testes experimentais, o que sugere uma dependência simultânea das velocidades superficiais das fases líquida e gasosa.

A análise dos testes #1 e #2 separadamente dos testes #3 e #4 revela que a velocidade da onda de pressão é proporcional à velocidade superficial de mistura do estado final. Entretanto, a velocidade da onda de pressão não está restrita à influência das propriedades do estado final. Verifica-se que as velocidades superficiais das fases líquida e gasosa do estado final para os testes #2 e #4 são praticamente idênticas, consoante à Tabela 5.1, bem como os parâmetros geométricos e cinemáticos do estado final são semelhantes, conforme as Tabelas 5.4 e 5.6. Desse modo, espera-se que as velocidades de propagação da onda de pressão para os testes #2 e #4 apresentem valores semelhantes, o que não é observado na Tabela 5.7. Essas evidências experimentais indicam que a velocidade da onda de pressão depende simultaneamente das propriedades dos estados inicial e final.

Tabela 5.7. Velocidades experimentais de propagação da onda de fração de vazio e da onda de pressão para os quatro testes experimentais.

Estações de Medição	z/D [-]	Teste #1		Teste #2		Teste #3		Teste #4	
		c_α [m/s]	c_p [m/s]	c_α [m/s]	c_p [m/s]	c_α [m/s]	c_p [m/s]	c_α [m/s]	c_p [m/s]
E1 - E2	230	1,17 $\pm 0,01$	24,1 $\pm 1,3$	1,47 \pm 0,01 $\pm 1,4$	26,5 $\pm 1,4$	1,17 $\pm 0,01$	18,8 $\pm 1,0$	1,47 $\pm 0,01$	21,7 $\pm 1,2$
E1 - E3	352	1,16 $\pm 0,01$	22,8 $\pm 1,2$	1,46 \pm 0,01 $\pm 1,4$	26,4 $\pm 1,4$	1,17 $\pm 0,01$	18,7 $\pm 1,0$	1,46 $\pm 0,01$	21,2 $\pm 1,2$
E2 - E3	429	1,16 $\pm 0,01$	22,0 $\pm 1,2$	1,46 \pm 0,01 $\pm 1,4$	26,4 $\pm 1,4$	1,16 $\pm 0,01$	18,6 $\pm 1,0$	1,45 $\pm 0,01$	20,9 $\pm 1,1$
E1 - E4	511	1,16 $\pm 0,01$	23,1 $\pm 1,3$	1,46 \pm 0,01 $\pm 1,4$	25,3 $\pm 1,4$	1,17 $\pm 0,01$	18,4 $\pm 1,0$	1,45 $\pm 0,01$	20,9 $\pm 1,1$
E2 - E4	588	1,16 $\pm 0,01$	22,8 $\pm 1,2$	1,46 \pm 0,01 $\pm 1,4$	25,0 $\pm 1,4$	1,16 $\pm 0,01$	18,3 $\pm 1,0$	1,45 $\pm 0,01$	20,7 $\pm 1,1$
E3 - E4	710	1,16 $\pm 0,01$	23,5 $\pm 1,3$	1,47 \pm 0,01 $\pm 1,3$	24,0 $\pm 1,3$	1,17 $\pm 0,01$	18,1 $\pm 1,0$	1,45 $\pm 0,01$	20,5 $\pm 1,1$
Velocidade Média		1,16 $\pm 0,01$	23,0 $\pm 1,3$	1,46 $\pm 0,01$	25,6 $\pm 1,4$	1,17 $\pm 0,01$	18,5 $\pm 1,0$	1,45 $\pm 0,01$	21,0 $\pm 1,1$

Calculam-se ainda os tempos médios de residência da onda de fração de vazio na seção de teste através da relação entre o comprimento total da seção de teste e as velocidades experimentais médias da onda de fração de vazio para os quatro testes experimentais. De modo semelhante, estimam-se os tempos médios de residência da onda de pressão através da relação entre o comprimento total da seção de teste e as velocidades experimentais médias da onda de pressão.

Para os testes experimentais com redução da velocidade superficial de mistura, testes #1 e #3, encontram-se tempos médios de residência da onda de fração de vazio de aproximadamente 22,6 s. Similarmente, estimam-se tempos médios de residência da onda de fração de vazio próximos de 18,0 s para os testes experimentais com aumento da velocidade superficial de mistura, testes #2 e #4.

Como as velocidades da onda de pressão são distintas para as quatro condições operacionais, os tempos médios de residência da onda de pressão na seção de teste também são irregulares. Para os testes #1 e #2, verificam-se tempos médios de residência da onda de pressão de, respectivamente, 1,1 s e 1,0 s, enquanto que a onda de pressão permanece no interior da seção de teste em média 1,4 s e 1,3 s, respectivamente, para os testes #3 e #4.

A frente da onda atinge a saída da seção de teste no instante médio de tempo definido pela soma entre o tempo médio de residência da onda no interior da seção de teste e o instante de tempo que o período transiente é induzido. Como o acionamento da válvula esfera de

fechamento rápido ou do inversor de frequência acoplado ao motor elétrico da bomba centrífuga de alimentação ocorre impreterivelmente 30 s após o início da aquisição de dados, soma-se 30 s aos tempos médios de residência calculados.

Os instantes médios de tempo que a frente da onda de fração de vazio alcança a saída da seção de teste são aproximadamente iguais a 52,6 s para os testes #1 e #3, enquanto a frente da onda de fração de vazio ingressa no tanque de descarga em média 48,0 s após o início da aquisição de dados para os testes #2 e #4. Complementarmente, os instantes médios de tempo que a frente da onda de pressão alcança a saída da seção de teste variam entre 31,0 s e 31,4 s para os quatro testes experimentais executados.

Os sinais médios de fração de vazio e de pressão apresentados nas Figuras 5.3 a 5.6 indicam que a obtenção do estado final ocorre no instante de tempo que a onda de fração de vazio egressa completamente da seção de teste. Entretanto, as variações da fração de vazio entre os estados inicial e final não acontecem instantaneamente, o que compromete a análise adequada desse fenômeno físico. Para os testes experimentais com variação brusca da fase gasosa, testes #1 e #2, os instantes médios de tempo que a frente da onda de fração de vazio alcança o término da seção de teste representam a obtenção do estado final observada nas Figuras 5.3c e 5.4c. De modo semelhante, o valor encontrado para o teste #4 corresponde à obtenção do estado final exposta pela Figura 5.6c. Contudo, a obtenção do estado final verificado na Figura 5.5c difere do instante médio de tempo estimado para o teste #3.

Os instantes médios de tempo que onda de fração de vazio alcança a saída da seção de teste obtidos através da relação entre o comprimento total e a velocidade experimental média da onda de fração de vazio são semelhantes aos instantes da obtenção do estado final observados nos testes #1 e #2, em concordância com as Figuras 5.3c e 5.4c. O período transiente da fração de vazio nos testes experimentais com variação da velocidade superficial de gás dura aproximadamente 2 s, conforme retratado nas Figuras 5.3b e 5.4b, o que justifica a convergência entre as duas metodologias de análise. A correta modelagem da estabilização do estado final no teste #4 é motivada pelo rápido amortecimento dos sinais médios de fração de vazio, consoante à Figura 5.5b. Entretanto, a variação entre os estados inicial e final apresenta oscilações amortecidas durante praticamente 10 s no teste #3, o que ocasiona a diferença registrada entre as duas abordagens.

O início do período transiente desloca-se ao longo da seção de teste com velocidade similar à onda de pressão, enquanto o término do período transiente é atingido quando a onda de fração de vazio sair totalmente da seção de teste. Desse modo, estima-se a duração do período transiente através da diferença entre a razão do comprimento total da seção de teste

dividido pela velocidade experimental da onda de fração de vazio e a razão do comprimento total da seção de teste dividido pela velocidade experimental da onda de pressão.

5.7 Onda de Fração de Vazio e Onda de Pressão: Modelos e Correlações

Os modelos e correlações de predição da velocidade de propagação da onda de fração de vazio encontrados e as respectivas equações são:

- Wallis (1969), Equações 2.5 e 2.6;
- Velocidade experimental de translação do nariz da bolha alongada;
- Velocidade *in situ* da fase gasosa através da correlação cinemática de Bendiksen (1984), Equação 5.7.

Sugere-se a utilização dos autovalores do modelo de *drift-flux* transiente propostos por Gavage (1991) na aproximação das velocidades da onda de fração de vazio e da onda de pressão. Os três autovalores do sistema hiperbólico são estimados pelas Equações 5.3 e 5.4:

$$\lambda_1 = u_G, \quad (5.3)$$

$$\lambda_{2,3} = u_L \pm \sqrt{\frac{P}{\rho_L \alpha (1 - C_0 \alpha)}}, \quad (5.4)$$

onde $\lambda_{1,2,3}$ são os autovalores, u_G é a velocidade *in situ* da fase gasosa e u_L é a velocidade *in situ* da fase líquida. A pressão absoluta é simbolizada por P , ρ_L é a massa específica da fase líquida, α é a fração de vazio da unidade e C_0 é o parâmetro de distribuição.

As velocidades da onda de fração de vazio e da onda de pressão são definidas pela combinação linear dos autovalores. A velocidade de propagação da onda de fração de vazio pode ser aproximada pelo autovalor mais lento do modelo de *drift-flux* transiente, em concordância com a Equação 5.5:

$$c_\alpha = \lambda_1 = u_G. \quad (5.5)$$

Como o pistão de líquido é não aerado nas condições operacionais analisadas, conforme Figura 5.2, a velocidade de translação do nariz da bolha alongada coincide com a velocidade *in situ* da fase gasosa. Desse modo, o autovalor do modelo de *drift-flux* transiente iguala-se às evidências experimentais de Saiz-Jabardo e Bouré (1989) e à formulação matemática de Lisseter e Fowler (1992). Fabre *et al.* (1995) também defendem que a velocidade da onda de fração de vazio coincide com a velocidade *in situ* da fase gasosa. Pode-

se ainda corroborar essa constatação através da modelagem fenomenológica do escoamento intermitente aliado à hipótese de que todo o gás é transportado pelas bolhas alongadas que se movem com a velocidade de translação do nariz da bolha alongada, dado que o pistão de líquido é não aerado. Similarmente, a velocidade de propagação da onda de pressão é frequentemente aproximada pelo autovalor mais rápido do modelo de *drift-flux* transiente, consoante à Equação 5.6:

$$c_p = \lambda_{2,3} . \quad (5.6)$$

Ademais, comparam-se as velocidades experimentais da onda de fração de vazio com a correlação cinemática proposta por Bendiksen (1984) para o escoamento de uma bolha isolada, conforme apresentado na Equação 5.7:

$$u_T = J + 0,54\sqrt{gD} , \quad (5.7)$$

visto que o número de Froude para os quatro testes experimentais é menor que 3,5.

Portanto, comparam-se as velocidades experimentais da onda de fração de vazio com as estimativas do modelo de Wallis (1969), com as velocidades experimentais de translação do nariz da bolha alongada e com as velocidades de translação do nariz da bolha alongada calculadas por intermédio da correlação cinemática de Bendiksen (1984).

Dentre os modelos e correlações encontrados na literatura, nota-se que alguns autores não definem se as propriedades empregadas nas equações referem-se ao estado inicial ou ao estado final, enquanto outros modelos baseados na aproximação da onda acústica não necessitam dessa informação, visto que as mudanças são infinitesimais. No presente estudo, as diferenças significativas das propriedades contínuas e discretas entre os estados inicial e final exigem a definição das propriedades do escoamento intermitente utilizadas.

Na modelagem das velocidades da onda de fração de vazio e da onda de pressão, empregaram-se as propriedades médias pertencentes ao estado final das respectivas estações de medição, visto que a velocidade da onda de fração de vazio depende das propriedades do estado final, conforme descrito na Seção 5.6. Ademais, o emprego das propriedades correspondentes ao estado final está em concordância com o transporte de massa e quantidade de movimento das ondas.

As velocidades experimentais da onda de fração de vazio são obtidas através do procedimento descrito na Seção 4.1. O RMS dos erros relativos entre as velocidades experimentais da onda de fração de vazio e as estimativas dos modelos listados no Capítulo 2 estão apresentados na Tabela 5.8. Os erros relativos médios entre os quatro testes experimentais estão expostos na última linha da Tabela 5.8. Analisaram-se as estimativas dos

modelos de predição da velocidade da onda de fração de vazio em seis posições axiais ao longo da seção de teste.

Para os transientes induzidos pela variação da fase gasosa, percebe-se que o modelo cinemático proposto por Wallis (1969) superestima as velocidades experimentais da onda de fração de vazio em 34,0% para o teste #1 e 63,8% para o teste #2. Analogamente, as velocidades experimentais da onda de fração de vazio calculadas para os transientes gerados pela mudança da fase líquida são superestimadas em 69,6% para o teste #3 e em 133,2% para o teste #4.

A modelagem da onda de fração de vazio por meio da velocidade experimental de translação do nariz da bolha alongada exposta nas Tabelas 5.3 a 5.6 apresenta erros relativos consideravelmente menores que os valores encontrados pelo modelo cinemático de Wallis (1969). O erro relativo mínimo de 3,1% ocorre no teste #1, à medida que o teste #3 registra o erro relativo máximo de 8,8%. Enfatiza-se que a velocidade experimental média de translação do nariz da bolha alongada é estimada para aproximadamente 15000 unidades, enquanto a velocidade experimental da onda de fração de vazio é calculada através do processo de média de conjunto para 100 aquisições, o que justifica a diferença encontrada entre as duas abordagens.

A modelagem da velocidade da onda de fração de vazio por meio da estimativa da velocidade de translação do nariz da bolha alongada através da correlação cinemática de Bendiksen (1984) revela o erro relativo máximo de 3,3% para o teste #2, ao passo que o teste #1 apresenta o erro relativo mínimo de 0,7%. Observa-se que a estimativa de Bendiksen (1984) manifesta os menores erros relativos para os quatro testes experimentais e, consequentemente, o menor erro relativo médio. Constatou-se que a estimativa da velocidade *in situ* da fase gasosa por meio da correlação cinemática de Bendiksen (1984) baseada no escoamento de uma bolha isolada demonstra menores erros relativos do que a aproximação através das velocidades de translação do nariz da bolha alongada obtidas experimentalmente. Entretanto, as razões físicas para essa observação residem no comportamento transiente do escoamento estudado.

As ondas de fração de vazio e de pressão ocorrem somente em escoamentos transientes e são causadas pelas alterações da velocidade de translação do nariz da bolha alongada, do comprimento da bolha alongada e do comprimento do pistão de líquido, conforme relatado na Seção 5.5. Os modelos comumente empregados na investigação fenomenológica do escoamento intermitente são modelos mecanicistas baseados no conceito de célula unitária, conforme descrito por Dukler e Hubbard (1975) e Taitel e Barnea (1990), bem como o

modelo de *drift-flux* unidimensional para regime permanente proposto por Wallis (1969). Contudo, estes modelos não podem ser aplicados devido à natureza transiente do escoamento. Os fenômenos físicos envolvidos no escoamento transiente no padrão golfadas podem ser explicados através do acoplamento entre as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, porém essa abordagem foge do escopo do presente trabalho.

Tabela 5.8. Erros relativos e erros relativos médios entre as velocidades experimentais da onda de fração de vazio e os modelos de predição da velocidade da onda de fração de vazio para os quatro testes experimentais.

	Wallis	u_T Experimental	u_T Bendiksen
Teste #1	34,0%	3,1%	0,7%
Teste #2	63,8%	5,8%	3,3%
Teste #3	69,6%	8,8%	1,9%
Teste #4	133,2%	4,4%	1,5%
Erro Relativo Médio	75,2%	5,5%	1,9%

A Figura 5.16 exibe as velocidades experimentais da onda de fração de vazio apresentadas na Tabela 5.7 e as respectivas barras de incerteza juntamente com as velocidades de translação do nariz da bolha alongada em função da distância a partir do injetor de correntes paralelas. A comparação entre as velocidades experimentais da onda de fração de vazio e as velocidades experimentais de translação do nariz da bolha alongada estão retratadas na Figura 5.16a. Adicionalmente, o comportamento das velocidades experimentais da onda de fração de vazio e das velocidades de translação do nariz da bolha alongada calculadas pela correlação cinemática de Bendiksen (1984) estão apresentados na Figura 5.16b. Os símbolos representam as velocidades experimentais da onda de fração de vazio, enquanto as linhas contínuas correspondem às estimativas dos modelos de predição da onda de fração de vazio.

Verifica-se que as velocidades experimentais da onda de fração de vazio são subestimadas pelas velocidades de translação do nariz da bolha alongada próximo à entrada da seção de teste nas Figuras 5.16a e 5.16b. As diferenças entre as velocidades experimentais da onda de fração de vazio e as velocidades de translação do nariz da bolha alongada diminuem ao longo da seção de teste. Nota-se ainda a maior concordância entre as velocidades experimentais da onda de fração de vazio e as velocidades de translação do nariz da bolha alongada estimadas pela correção cinemática de Bendiksen (1984) em comparação com as velocidades de translação do nariz da bolha alongada obtidas experimentalmente. Portanto, conclui-se que a estimativa de Bendiksen (1984) revela a melhor concordância com

a velocidade de propagação da onda de fração de vazio entre as três metodologias de predição avaliadas.

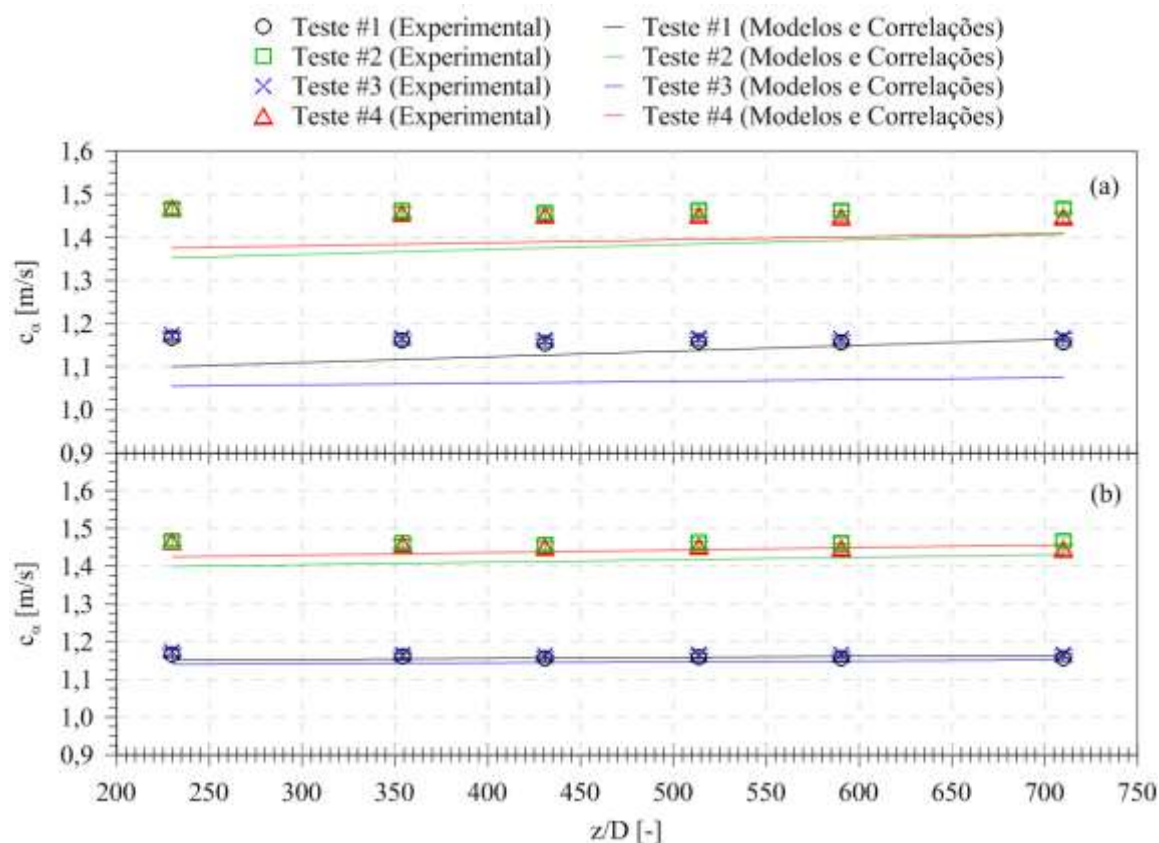


Figura 5.16. Velocidades experimentais da onda de fração de vazio em comparação com (a) as velocidades experimentais de translação do nariz da bolha alongada e (b) as velocidades de translação do nariz da bolha alongada estimadas pela correlação cinemática de Bendiksen (1984) para os quatro testes experimentais.

Os modelos e correlações de predição da velocidade de propagação da onda de pressão listados e as respectivas equação são:

- Henry *et al.* (1971), Equação 2.7;
- Martin e Padmanabhan (1979), Equação 2.10;
- Matsui *et al.* (1979), Equação 2.11;
- Legius *et al.* (1997), Equação 2.12;
- Lee *et al.* (1998), Equação 2.13;
- Xu *et al.* (2008), Equação 2.14;
- Gavage (1991), Equação 5.4.

A velocidade experimental da onda de pressão fundamenta-se no procedimento retratado na Seção 4.1. O RMS dos erros relativos entre as velocidades experimentais da onda de pressão e as velocidades calculadas através dos modelos listados no Capítulo 2 estão

exibidas na Tabela 5.9. Os erros relativos médios entre os quatro testes experimentais estão apresentados na última linha da Tabela 5.9. Similarmente às velocidades da onda de fração de vazio, avaliaram-se os modelos de predição da onda de pressão em seis posições axiais ao longo da seção de teste e empregaram-se as propriedades médias correspondentes ao estado final das respectivas estações de medição. Ressalta-se o uso do coeficiente politrópico igual a 1, visto que o escoamento intermitente é considerado isotérmico devido à elevada capacidade térmica da água em comparação com o ar.

Nota-se que o modelo de Henry *et al.* (1971) superestima as velocidades de propagação da onda de pressão em, no mínimo, 1735,9%. De modo semelhante, o modelo de Lee *et al.* (1998) apresenta erros relativos superiores a 2419,6%. As maiores diferenças entre as velocidades experimentais e os modelos de predição da onda de pressão são encontradas para o modelo de Henry *et al.* (1971) e o modelo de Lee *et al.* (1998), posto que esses dois modelos visam a modelagem da velocidade de propagação da onda rápida de pressão.

O modelo proposto por Legius *et al.* (1997) superestima a velocidade de propagação da onda de pressão para os quatro testes experimentais. A menor dispersão entre as velocidades experimentais da onda de pressão e as velocidades calculadas pelo modelo de Legius *et al.* (1997) é de 20,1% para o teste #2, enquanto a maior dispersão do modelo é de 79,1% para o teste #3. O modelo sugerido por Xu *et al.* (2008) exhibe erros relativos próximos de 94% para os quatro testes experimentais.

Os modelos mais acurados de predição da velocidade da onda de pressão são os modelos de Martin e Padmanabhan (1979), Matsui *et al.* (1979) e Gavage (1991). No modelo de Matsui *et al.* (1979) com coeficiente politrópico k igual a 1, as velocidades experimentais da onda de pressão são superestimadas em 13,1% no teste #1 e em 17,0% para o teste #2, enquanto os testes #3 e #4 apresentam erros relativos de, respectivamente, 17,9% e 1,4%. O modelo indicado por Martin e Padmanabhan (1979) com coeficiente politrópico k igual a 1 demonstra erro relativo máximo de 19,9% para o teste #2 e erro relativo mínimo de 2,6% para o teste #4. Por fim, considerou-se o modelo de *drift-flux* transiente proposto por Gavage (1991) com coeficiente de distribuição C_0 igual a 1. As estimativas do modelo da onda de pressão sugerido por Gavage (1991) apresentam erros relativos de 4,8% e 16,0% para os transientes causados pela mudança da vazão volumétrica de gás, ao passo que a diferença é de 10,4% e 2,6% para os transientes induzidos pela variação da vazão volumétrica de líquido.

Constata-se que as velocidades da onda de pressão para os testes experimentais com redução súbita da velocidade superficial de uma das fases, testes #1 e #3, exibem melhor concordância no modelo de Martin e Padmanabhan (1979). A menor diferença entre os

valores experimentais e as estimativas dos modelos para o teste #2 é obtida pelo modelo de Gavage (1991), enquanto a velocidade da onda de pressão para o teste #4 é melhor prevista pelo modelo de Matsui *et al.* (1979).

Os menores erros relativos médios são registrados para os modelos de Martin e Padmanabhan (1979) e de Gavage (1991). O modelo de Martin e Padmanabhan (1979) apresenta erro relativo médio de 8,1%, enquanto o modelo de Gavage (1991) exibe erro relativo médio de 8,5%. Como a diferença entre os erros relativos médios dos dois modelos é inferior à incerteza relativa da velocidade experimental da onda de pressão, os erros relativos médios são considerados equivalentes. Desse modo, o melhor desempenho geral entre os modelos de predição da velocidade da onda de pressão é compartilhado pelos modelos de Martin e Padmanabhan (1979) e pelo modelo de Gavage (1991). Verifica-se ainda que a única diferença entre os modelos de Martin e Padmanabhan (1979) e de Gavage (1991) consiste na utilização da velocidade *in situ* da fase líquida, o que justifica os resultados similares, uma vez que as velocidades superficiais de água empregadas nos quatro testes experimentais são relativamente baixas.

Tabela 5.9. Erros relativos e erros relativos médios entre as velocidades experimentais da onda de pressão e os modelos de predição da velocidade da onda de pressão para os quatro testes experimentais.

	Henry <i>et al.</i>	Martin e Padmanabhan	Matsui <i>et al.</i>	Legius <i>et al.</i>	Lee <i>et al.</i>	Xu <i>et al.</i>	Gavage
Teste #1	2274,2%	2,9%	13,1%	35,6%	3458,6%	93,5%	4,8%
Teste #2	1735,9%	19,9%	17,0%	20,1%	2419,6%	94,8%	16,0%
Teste #3	2303,8%	6,9%	17,9%	79,1%	2803,3%	93,0%	10,4%
Teste #4	2137,0%	2,6%	1,4%	46,7%	2926,0%	93,7%	2,6%
Erro Relativo Médio	2112,7%	8,1%	12,4%	45,4%	2901,9%	93,8%	8,5%

As velocidades experimentais da onda de pressão mostradas na Tabela 5.7 e as respectivas barras de incertezas juntamente com as estimativas dos três modelos de predição com menores erros relativos médios estão expostas em função da distância a partir do injetor de correntes paralelas na Figura 5.17. A Figura 5.17a exibe as velocidades experimentais da onda de pressão e as velocidades calculadas através do modelo de Matsui *et al.* (1979). A comparação entre as velocidades experimentais da onda de pressão e as velocidades determinadas pelo modelo de Martin e Padmanabhan (1979) está demonstrada na Figura 5.17b. Por fim, a Figura 5.17c mostra as velocidades experimentais e as estimativas obtidas

pelo modelo de *drift-flux* transiente de Gavage (1991). Os símbolos correspondem às velocidades experimentais da onda de pressão, enquanto as linhas contínuas representam as estimativas dos modelos de predição da onda de pressão.

Percebe-se que os três modelos de predição capturam a tendência de desaceleração da velocidade da onda de pressão para os quatro testes experimentais. As velocidades da onda de pressão calculadas através dos três modelos para os testes #2 e #4 apresentam valores semelhantes, o que contraria as velocidades experimentais da onda de pressão encontradas. O modelo de Matsui *et al.* (1979) indica que o teste #3 manifesta as maiores velocidades de propagação da onda de pressão, contudo os testes experimentais revelam as menores velocidades para o teste #3. Os modelos de Martin e Padmanabhan (1979) e de Gavage (1991) registram as maiores velocidades da onda de pressão para o teste #1 e as menores velocidades para o teste #3. Ademais, as velocidades experimentais do teste #2 são subestimadas e as velocidades experimentais do teste #3 são superestimadas pelos três modelos de predição.

As velocidades experimentais da onda de pressão para os testes #1 e #2 são subestimadas pelo modelo de Matsui *et al.* (1979), ao passo que as velocidades experimentais do teste #3 são superestimadas. O modelo de Matsui *et al.* (1979) descreve satisfatoriamente as velocidades de propagação da onda de pressão correspondentes ao teste #4.

O modelo de Martin e Padmanabhan (1979) prevê adequadamente as velocidades da onda de pressão referentes aos testes #1 e #4, ao mesmo tempo em que as velocidades referentes ao teste #2 são subestimadas. As velocidades experimentais do teste #3 são corretamente modeladas pelo modelo de Martin e Padmanabhan (1979) nas regiões próximas do injetor de correntes paralelas. Contudo, a concordância entre as velocidades experimentais e o modelo decresce ao longo da seção de teste e as velocidades experimentais são superestimadas em distâncias superiores a 400 D.

Além disso, o modelo de Gavage (1991) prediz satisfatoriamente as velocidades experimentais do teste #1, com exceção da velocidade estimada a 429 D a partir do injetor de correntes paralelas. As velocidades experimentais da onda de pressão para o teste #2 são subestimadas, enquanto as velocidades experimentais para o teste #3 são superestimadas em toda a extensão da seção de teste. O modelo proposto por Gavage (1991) descreve adequadamente as velocidades experimentais correspondentes ao teste #4.

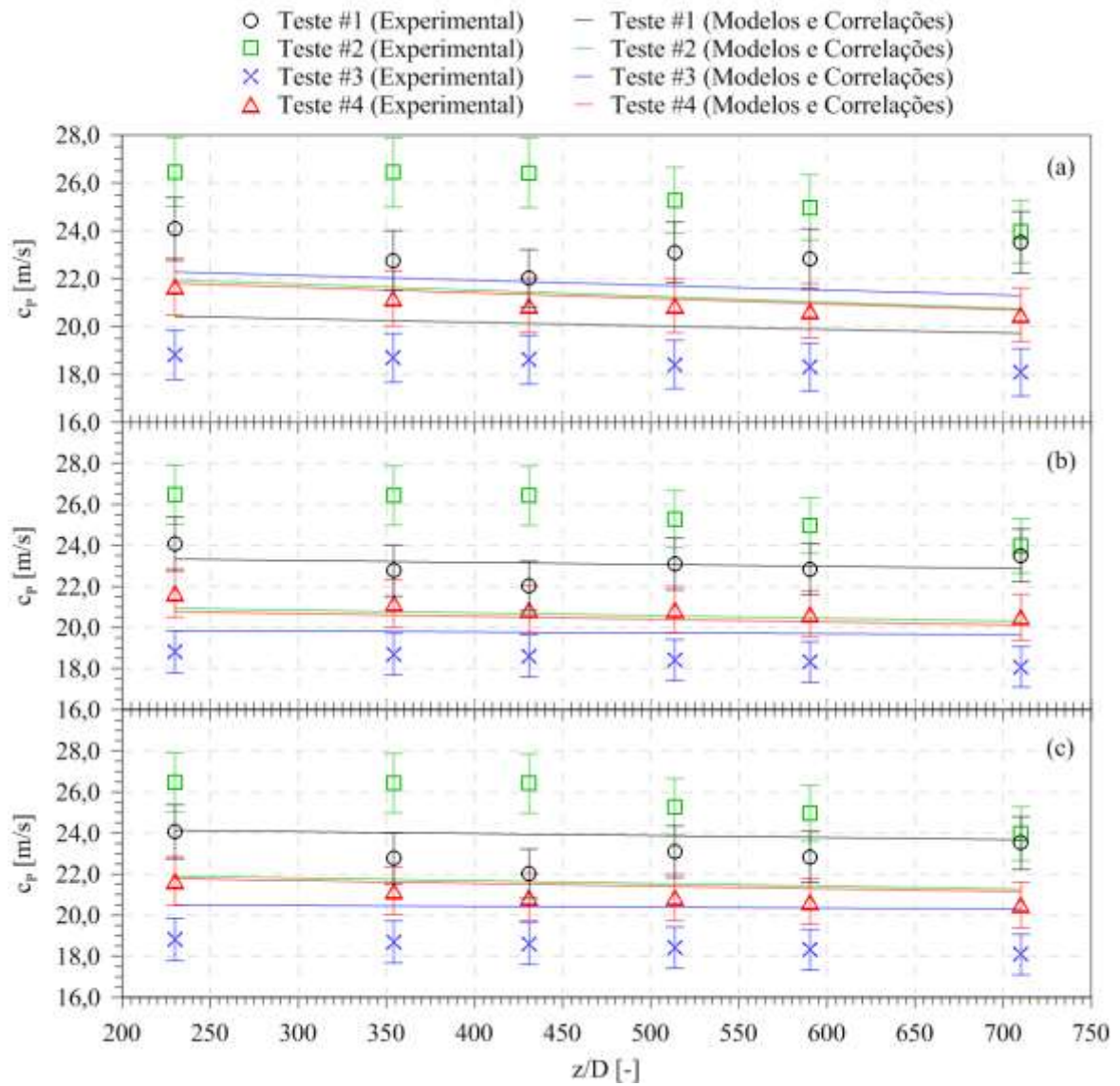


Figura 5.17. Velocidades experimentais da onda de pressão em comparação com (a) o modelo de Matsui *et al.* (1979), (b) o modelo de Martin e Padmanabhan (1979) e (c) o modelo de Gavage (1991) para os quatro testes experimentais.

6 CONCLUSÕES

Os sinais médios de fração de vazio apresentam saltos entre os estados inicial e final nos transientes induzidos pela variação súbita da velocidade superficial da fase gasosa, ao passo que os perfis médios de pressão exibem *undershoot* ou *overshoot*. Complementarmente, os sinais médios de fração de vazio nos transientes causados pela mudança brusca da velocidade superficial da fase líquida revelam oscilações amortecidas no período transiente, ao mesmo tempo em que os perfis médios de pressão mostram mudanças íngremes seguidas por aproximações instáveis até atingir o estado final. As diferenças das ondas de fração de vazio e de pressão entre os testes experimentais induzidos por variações repentinas das fases líquida e gasosa estão associados ao processo de formação de golfadas. As ondas experimentais de fração de vazio são não dispersivas, posto que apresentam forma conservativa e sua amplitude permanece constante ao longo da seção de teste. Por outro lado, as ondas experimentais de pressão são dispersivas, visto que não exibem forma conservativa e revelam atenuação ao longo da seção de teste. Por fim, a relação entre a velocidade experimental da onda de pressão e a velocidade experimental da onda de fração de vazio permanece entre 14:1 e 21:1 para os quatro testes experimentais executados.

Assim que a mudança da velocidade superficial de uma das fases é introduzida na entrada da seção de teste, a velocidade de translação do nariz da bolha alongada também é alterada ao longo da seção de teste com velocidade similar à da onda de pressão. Nos instantes imediatamente após o início do período transiente, percebe-se uma variação abrupta da pressão devido à alteração da velocidade de mistura, enquanto a velocidade de translação do nariz da bolha alongada corresponde ao estado final e os comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido preservam as características do estado inicial.

As bolhas alongadas e os pistões de líquido gerados pela alteração da velocidade superficial de uma das fases deslocam-se com velocidade similar à onda de fração de vazio. A onda de fração de vazio é modificada devido à chegada das bolhas alongadas e dos pistões de líquido com as características do estado final, indicando a frente da onda de fração de vazio. As mudanças dos comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido também provocam variações nos sinais médios da pressão. Os perfis médios de pressão iniciam a recuperação gradual nos transientes induzidos pela alteração da fase gasosa e a aproximação irregular nos

transientes provocados pela mudança da fase líquida. A estabilização final dos perfis médios de pressão ocorrem após a onda de fração de vazio sair totalmente da seção de teste.

O início do período transiente é transmitido ao longo da seção de teste com velocidade similar à onda de pressão, enquanto o término do período transiente é alcançado quando a onda de fração de vazio sair completamente da seção de teste. Portanto, estima-se a duração do período transiente através da diferença entre a razão do comprimento total da seção de teste dividido pela velocidade experimental da onda de fração de vazio e a razão do comprimento total da seção de teste dividido pela velocidade experimental da onda de pressão.

As velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão são aproximadas satisfatoriamente através dos autovalores do modelo de *drift-flux*. A correlação cinemática de Bendiksen (1984) apresenta a melhor concordância com as velocidades experimentais de propagação da onda de fração de vazio para os quatro testes experimentais, exibindo erro relativo médio de 1,9%. Adicionalmente, o melhor desempenho geral entre os modelos e correlações de predição da velocidade de propagação da onda de pressão é registrado pelo modelo de Martin e Padmanabhan (1979) e pelo modelo de Gavage (1991).

Como trabalhos futuros, propõe-se o estudo experimental da influência da pressão de operação, da orientação e do comprimento da seção de teste no amortecimento das flutuações devido ao atrito do escoamento bifásico gás-líquido com as paredes da tubulação. Sugere-se ainda a investigação da influência da viscosidade dos fluidos de testes nas características das ondas de fração de vazio e de pressão.

REFERÊNCIAS

BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 10, n. 4, p. 467-483, 1984.

DUARTE, M. **Influência da viscosidade sobre o escoamento gás-líquido horizontal intermitente**. 2007. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 14, n. 4, p. 337-347, 1975.

FABRE, J.; LINÉ, A.; GADOIN, E. Void and pressure waves in slug flow. In: **IUTAM Symposium on Waves in Liquid/Gas and Liquid/Vapour Two-Phase Systems**. Springer Netherlands, 1995. p. 25-44.

GAVAGE, S. B. **Analyse numérique des modèles hydrodynamiques d'écoulements diphasiques instationnaires dans les réseaux de production pétrolière**. 1991. Thèse, ENS Lyon.

HENRY, R. E.; GROLMES, M. A.; FAUSKE, H. K. **Pressure-pulse propagation in two-phase one-and two-component mixtures**. Argonne National Lab., Ill., 1971.

KING, M. J. S.; HALE, C. P.; LAWRENCE, C. J.; HEWITT, G. F. Characteristics of flowrate transients in slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 24, n. 5, p. 825-854, 1998.

LEE, S. J.; CHANG, K. S.; KIM, K. Pressure wave speeds from the characteristics of two fluids, two-phase hyperbolic equation system. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 24, n. 5, p. 855-866, 1998.

LEGIUS, H. J. W. M.; VAN DEN AKKER, H. E. A.; NARUMO, T. Measurements on wave propagation and bubble and slug velocities in cocurrent upward two-phase flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 15, n. 3, p. 267-278, 1997.

LISSETER, P. E.; FOWLER, A. C. Bubbly Flow - II: Modelling void fraction waves. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 18, n. 2, p. 205-215, 1992.

MARTIN, C. S.; PADMANABHAN, M. Pressure pulse propagation in two-component slug flow. **Journal of Fluids Engineering**, v. 101, n. 1, p. 44-52, 1979.

MATSUI, G.; SUGIHARA, M.; ARIMOTO, S. Propagation characteristics of pressure wave through gas-liquid plug-train system: 1st Report, Step response. **Bulletin of JSME**, v. 22, n. 173, p. 1562-1569, 1979.

MATUSZKIEWICZ, A.; FLAMAND, J. C.; BOURE, J. A. The bubble - slug flow pattern transition and instabilities of void fraction waves. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 13, n. 2, p. 199-217, 1987.

MOISSIS, R.; GRIFFITH, P. Entrance effects in a two-phase slug flow. **Journal of Heat Transfer**, v. 84, n. 1, p. 29-38, 1962.

NGUYEN, D. L.; WINTER, E. R. F.; GREINER, M. Sonic velocity in two-phase systems. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 7, n. 3, p. 311-320, 1981.

NYDAL, O. J.; PINTUS, S.; ANDREUSSI, P. Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 18, n. 3, p. 439-453, 1992.

PAUCHON, C.; BANERJEE, S. Interphase momentum interaction effects in the averaged multifield model. Part II: Kinematic waves and interfacial drag in bubbly flows. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 14, n. 3, p. 253-264, 1988.

ROSA, E. S.; SALGADO, R. M.; OHISHI, T.; MASTELARI, N. Performance comparison of artificial neural networks and expert systems applied to flow pattern identification in vertical ascendant gas-liquid flows. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 36, n. 9, p. 738-754, 2010.

SAIZ-JABARDO, J. M.; BOURÉ, J. A. Experiments on void fraction waves. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 15, n. 4, p. 483-493, 1989.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2006.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-phase slug flow. **Adv. Heat Transfer**, v. 20, p. 83-132, 1990.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v. 22, n. 1, p. 47-55, 1976.

UJANG P.M.; LAWRENCE, C.J.; HALE, C.P.; HEWITT, G.F. Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 32, n. 5, p. 527-552, 2006.

VIGNERON, F.; SARICA, C.; BRILL, J. P. Experimental analysis of imposed two-phase flow transients in horizontal pipelines. In: **7th International Conference, Multiphase**. 1995. p. 199-217.

WALLIS, G. B. **One-dimensional two-phase flow**. New York: McGraw-Hill, 1969.

WHITHAM, G. B. **Linear and Nonlinear Waves**. John Wiley&Sons, NewYork, 1974.

XU, X.X.; GONG, J. A united model for predicting pressure wave speeds in oil and gas two-phase pipeflows. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 60, n. 3, p. 150-160, 2008.

ZUBER, N.; FINDLAY, J. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. **Journal of Heat Transfer**, v. 87, n. 4, p. 453-468, 1965.

APÊNDICE A - ANÁLISE DE INCERTEZAS

As incertezas referentes às medições da fração de vazio média e da pressão média estão apresentadas na primeira seção deste apêndice. A segunda seção exibe as incertezas na estimativa das velocidades de propagação da onda de fração de vazio e da onda de pressão. Por fim, a terceira seção expõe as incertezas correspondentes aos parâmetros médios geométricos e cinemáticos do escoamento no padrão intermitente.

Na análise de incertezas desenvolvida no presente trabalho, empregam-se os dados experimentais do teste #1 e extrapolam-se os resultados alcançados para os demais testes experimentais. Em determinados casos, a incerteza absoluta truncada em concordância com algarismos significativos resulta em valores nulos. Desse modo, registra-se a substituição das incertezas absolutas anuladas pelos valores imediatamente superiores, visto que todas as propriedades contínuas e discretas apresentam incertezas associadas.

A.1 Análise de Incertezas da Fração de Vazio Média e da Pressão Média

Transformam-se os sinais médios de $(1-V^*)$ das 100 aquisições pertencentes às quatro estações de medição do teste #1 em sinais de fração de vazio através da curva de calibração dos respectivos sensores de condutância. Classifica-se a evolução temporal dos sinais médios de fração de vazio dos estados iniciais e finais em 20 classes distintas e calculam-se as médias e os desvios padrões. Geram-se as funções densidade de probabilidade exibidas na Figura 6.1, cujas linhas contínuas correspondem aos estados iniciais e as linhas tracejadas referem-se aos estados finais de cada estação de medição. Emprega-se a distribuição *t-Student* dada pela Equação A.1 e um intervalo de confiabilidade de 95% para estimar a incerteza absoluta da fração de vazio média:

$$\delta\bar{\alpha} = \frac{t_v \sigma}{\sqrt{N}}, \quad (\text{A.1})$$

onde $\delta\bar{\alpha}$ é a incerteza absoluta da fração de vazio média, t_v é o coeficiente *t-Student* dependente do intervalo de confiabilidade adotado e do número de amostras, σ é o desvio padrão e N é o número de amostras. Nesse caso, o coeficiente *t-Student* é igual a 1,980 e o número de amostras é 100. Em seguida, calculam-se as incertezas relativas da fração de vazio

média através da relação entre a incerteza absoluta da fração de vazio média e o valor médio de fração de vazio, conforme expresso na Equação A.2:

$$\varepsilon \bar{\alpha} = \frac{\delta \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}}, \quad (\text{A.2})$$

onde $\varepsilon \bar{\alpha}$ é a incerteza relativa da fração de vazio média. Por fim, encontra-se a média das incertezas relativas da fração de vazio média entre os sinais oriundos das quatro estações de medição, o que equivale a 1,0%.

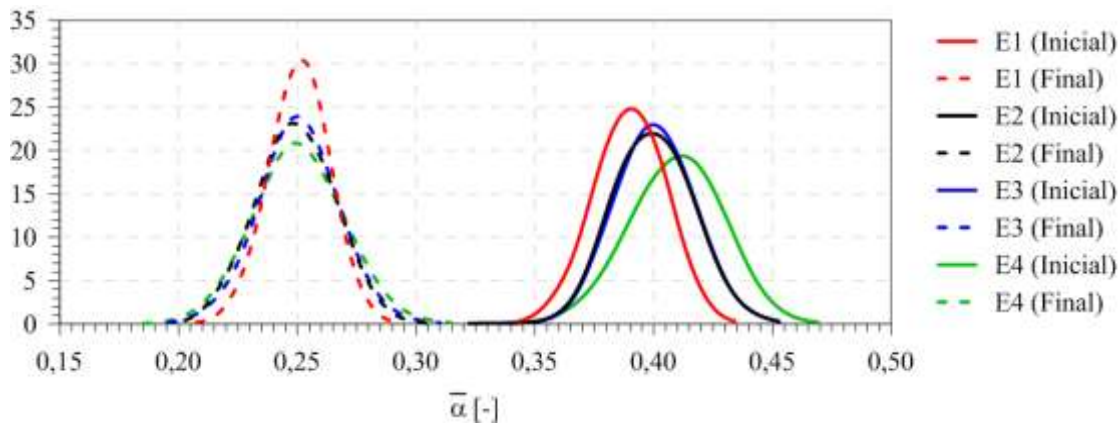


Figura A.1. Funções densidade de probabilidade da fração de vazio média dos estados inicial e final para as quatro estações de medição do teste #1.

A incerteza absoluta na medição da pressão média coincide com a resolução máxima do manômetro de mercúrio utilizado na calibração dos transdutores de pressão. Como a resolução máxima do manômetro é igual a 1 mm de mercúrio, a incerteza absoluta da pressão média corresponde a $\pm 0,1$ kPa para os quatro testes experimentais.

A.2 Análise de Incertezas das Velocidades da Onda de Fração de Vazio e da Onda de Pressão

Na análise de incertezas das velocidades de propagação da onda de fração de vazio e da onda de pressão, dividem-se as 100 aquisições do teste #1 em 10 grupos. Determinam-se as velocidades das ondas de fração de vazio e de pressão para cada um dos 10 grupos, bem como as velocidades médias e os desvios padrões, conforme apresentado na Tabela A.1.

Aplica-se a distribuição *t-Student* e um intervalo de confiabilidade de 95% para calcular a incerteza absoluta da velocidade da onda de fração de vazio e da onda de pressão.

Nesse caso, o coeficiente *t-Student* é igual a 2,262 e o número de amostras é 10. Dessa forma, determina-se a incerteza absoluta para a velocidade da onda de fração de vazio de 0,01 m/s, o que corresponde à incerteza relativa de 0,8%. Para a velocidade da onda de pressão, calcula-se a incerteza absoluta de 1,2 m/s e, por consequência, a incerteza relativa de 5,5%.

Tabela A.1. Velocidades da onda de fração de vazio (c_α) e da onda de pressão (c_p) para análise de incertezas.

	c_α [m/s]	c_p [m/s]
Grupo 1	1,15	20,0
Grupo 2	1,16	23,3
Grupo 3	1,14	19,6
Grupo 4	1,12	22,1
Grupo 5	1,15	21,5
Grupo 6	1,14	21,8
Grupo 7	1,14	24,1
Grupo 8	1,12	21,3
Grupo 9	1,14	20,6
Grupo 10	1,12	24,7
Velocidade Média	1,14	21,9
Desvio Padrão	0,01	1,2

A.3 Análise de Incertezas dos Parâmetros Médios Geométricos e Cinemáticos

Nesta seção, estimam-se as incertezas relativas nas medições da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada ($\varepsilon \bar{u}_T$), do comprimento adimensional médio da bolha alongada ($\varepsilon \bar{L}_B/D$), do comprimento adimensional médio do pistão de líquido ($\varepsilon \bar{L}_S/D$), da frequência média de passagem de golfadas ($\varepsilon \bar{f}$), do fator médio de intermitência ($\varepsilon \bar{\beta}$) e da taxa média de coalescência ($\varepsilon \bar{C}$).

A determinação do fator de corte empregado no processamento de dados não possui metodologia objetiva e consiste em uma das principais incertezas nas medições dos parâmetros geométricos e cinemáticos. O intervalo de tempo necessário para a bolha alongada percorrer a distância correspondente ao espaçamento entre os dois sensores de uma estação de medição (ΔTB_j), bem como os tempos de residência da bolha alongada ($tb_{i,j}$), do pistão de

líquido ($ts_{i,j}$) e, conseqüentemente, da unidade ($tu_{i,j}$) são dados fundamentais no cálculo das propriedades do escoamento intermitente e são diretamente influenciados pela escolha do fator de corte. Fatores de corte maiores aumentam o tempo de residência da bolha alongada e reduzem o tempo de residência do pistão de líquido, o que implica no aumento do comprimento da bolha alongada e na redução do comprimento do pistão de líquido. O intervalo de tempo gasto pela bolha alongada no percurso entre os sensores de condutância empregado no cálculo da velocidade de translação do nariz da bolha alongada e o tempo de residência da unidade utilizado na determinação da frequência de passagem de golfadas também são afetados pelo fator de corte.

A.3.1 Incerteza da Velocidade Média de Translação do Nariz da Bolha Alongada

A velocidade de translação do nariz da bolha alongada é calculada pela relação entre o espaçamento das hastes metálicas dos dois sensores de condutância de determinada estação de medição e o intervalo de tempo necessário para o nariz da bolha alongada realizar esse percurso, consoante à Equação 4.4.

A incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada está expressa pela Equação A.3:

$$\varepsilon \bar{u}_T = \sqrt{\left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta t}{\Delta TB_j}\right)^2 + (\varepsilon \bar{J}_L)^2 \left(\frac{\bar{J}_L}{\bar{u}_T}\right)^2 + (\varepsilon \bar{J}_G)^2 \left(\frac{\bar{J}_G}{\bar{u}_T}\right)^2 + (\varepsilon FC_{\bar{u}_T})^2}, \quad (A.3)$$

onde o primeiro e o segundo termos a direita correspondem, respectivamente, à incerteza relativa na medição do espaçamento entre os dois sensores de condutância e à incerteza relativa referente ao intervalo de tempo necessário para o nariz da bolha alongada percorrer a distância entre as duas hastes metálicas dos sensores. O terceiro e quarto termos do lado direito referem-se, respectivamente, à incerteza relativa ocasionada pelas flutuações das velocidades superficiais médias das fases líquida e gasosa durante as aquisições. O quinto termo compreende a incerteza relativa na medição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada atribuída ao fator de corte.

Medem-se os espaçamentos entre as hastes metálicas dos sensores de condutância das quatro estações de medição com um micrômetro, cuja resolução máxima é de 0,1 mm.

Portanto, considerou-se a incerteza associada à medição do espaçamento desprezível, uma vez que $\delta S/S \rightarrow 0$.

O tempo gasto pela bolha alongada no deslocamento entre os dois sensores de condutância de uma estação de medição pode ser obtido pela relação entre o espaçamento das hastes metálicas dos dois sensores e a velocidade de translação do nariz da bolha alongada, em concordância com a Equação A.4:

$$\Delta TB_j = \frac{S}{u_{Tj}}, \quad (\text{A.4})$$

e a incerteza absoluta na medição do tempo ($\delta \Delta t$) é estimada pela Equação A.5:

$$\delta \Delta t = \frac{2}{f_{aq}}, \quad (\text{A.5})$$

onde f_{aq} é a frequência de aquisição de dados. Logo, substitui-se o segundo termo do lado direito da Equação A.3 pela Equação A.6:

$$\frac{\delta \Delta t}{\Delta TB_j} = \frac{2}{f_{aq}} \frac{u_{Tj}}{S}. \quad (\text{A.6})$$

Desse modo, julga-se desprezível a incerteza relativa referente ao intervalo de tempo necessário para o nariz da bolha alongada percorrer a distância entre as hastes metálicas dos sensores de condutância de determinada estação de medição, visto que a frequência de aquisição é igual a 3000 Hz para os quatro testes experimentais.

Na determinação da incerteza relativa correspondente às velocidades superficiais médias das fases líquida e gasosa, analisam-se as 100 aquisições do teste #1 e encontra-se a maior flutuação em relação ao valor médio para cada uma das fases. Desse modo, as incertezas relativas vinculadas às velocidades superficiais médias das fases líquida e gasosa são, respectivamente, 1,5% e 3,8%. A relação matemática entre a velocidade de translação do nariz da bolha alongada e a velocidade superficial de mistura é dada pela correlação cinemática de Zuber e Findlay (1965), conforme Equação 2.1, e o número de Froude manteve-se menor que 3,5 nas condições operacionais analisadas. Logo, as incertezas relativas das velocidades superficiais médias das fases líquida e gasosa contribuem para a incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada, conforme descrito pelos terceiro e quarto termos a direita da Equação A.3.

Investiga-se a incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada associada à escolha do fator de corte através das aquisições do teste #1. Como os fatores de corte empregados no processamento de dados estão contidos entre 0,5 e 0,8,

encontram-se a velocidade média de translação do nariz da bolha alongada e o respectivo desvio padrão para os estados inicial e final das quatro estações de medição. Em seguida, aplica-se novamente a distribuição *t-Student* e calculam-se as incertezas absolutas e relativas nesta faixa de valores. Encontra-se a incerteza relativa média da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada atribuída ao fator de corte igual a 0,6%. Finalmente, substituem-se os valores obtidos na Equação A.3 e determina-se a incerteza relativa na medição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada de 1,7%.

A.3.2 Incerteza do Comprimento Adimensional Médio da Bolha Alongada

O comprimento da bolha alongada é estimado pela multiplicação da velocidade de translação do nariz da bolha alongada e do tempo de residência da bolha alongada, em concordância com o apresentado na Equação 4.5.

A incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio da bolha alongada é expressa pela Equação A.7:

$$\varepsilon \bar{L}_B / D = \sqrt{(\varepsilon \bar{u}_T)^2 + (\varepsilon t_B)^2 + (\varepsilon F C_{\bar{L}_B/D})^2}, \quad (\text{A.7})$$

onde o primeiro e segundo termos a direita correspondem, respectivamente, à incerteza relativa na medição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada e à incerteza relativa na estimativa do tempo de residência da bolha alongada. O terceiro termo refere-se à incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio da bolha alongada associada ao fator de corte.

Em conformidade com a Seção A.3.1, a incerteza relativa na medição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada é 1,7%. Considera-se a incerteza relativa correspondente ao tempo de residência da bolha alongada desprezível, uma vez que a frequência de aquisição é igual a 3000 Hz e os tempos de residência da bolha alongada são maiores que 0,1 s para as quatro condições operacionais.

Similarmente à incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada vinculada ao fator de corte, examina-se a influência de diferentes fatores de corte no comprimento adimensional médio da bolha alongada e admite-se a incerteza relativa média entre os cenários analisados. Logo, a incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio da bolha alongada associada à escolha do fator de corte é 4,5%. Por

consequência, a incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio da bolha alongada é 4,8%.

A.3.3 Incerteza do Comprimento Adimensional Médio do Pistão de Líquido

O comprimento do pistão de líquido é obtido pela multiplicação da velocidade de translação do nariz da bolha alongada e do tempo de residência do pistão de líquido, conforme retratado na Equação 4.6.

A incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio do pistão de líquido é expressa pela Equação A.8:

$$\varepsilon \bar{L}_s / D = \sqrt{(\varepsilon \bar{u}_T)^2 + (\varepsilon t_s)^2 + (\varepsilon F C_{\bar{L}_s/D})^2}, \quad (\text{A.8})$$

onde o primeiro e segundo termos a direita referem-se, respectivamente, à incerteza relativa na medição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada e à incerteza relativa na estimativa do tempo de residência da bolha alongada. O terceiro termo corresponde à incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio do pistão de líquido vinculada ao fator de corte.

A incerteza relativa na medição da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada é igual a 1,7%, consoante à Seção A.3.1. Assume-se a incerteza relativa na estimativa do tempo de residência do pistão de líquido desprezível, já que a frequência de amostragem é de 3000 Hz e os tempos de residência do pistão de líquido são superiores a 0,1 s para os quatro testes experimentais.

Analogamente à incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada associada ao fator de corte, avalia-se a influência de diversos fatores de corte no comprimento adimensional médio do pistão de líquido e considera-se a incerteza relativa média. Por conseguinte, a incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio do pistão de líquido atribuída ao fator de corte é igual a 5,1%. Portanto, a incerteza relativa na medição do comprimento adimensional médio do pistão de líquido é 5,4%.

A.3.4 Incerteza do Fator Médio de Intermitência

O fator de intermitência é calculado através da relação entre o comprimento da bolha alongada e o comprimento da unidade, sendo o comprimento da unidade definido pela soma do comprimento da bolha alongada e do comprimento do pistão de líquido, consoante à Equação 4.8.

A incerteza relativa do fator médio de intermitência é expressa pela Equação A.9:

$$\varepsilon_{\bar{\beta}} = \sqrt{\left(\varepsilon_{\bar{L}_B} / D\right)^2 \left(1 + \bar{\beta}^2\right) + \left(\varepsilon_{\bar{L}_s} / D\right)^2 \left(1 - \bar{\beta}\right)^2 + \left(\varepsilon_{FC_{\bar{\beta}}}\right)^2}, \quad (\text{A.9})$$

onde as incertezas relativas nas medições do comprimento adimensional médio da bolha alongada e do comprimento adimensional médio do pistão de líquido ponderadas pelo fator médio de intermitência são expressas, respectivamente, pelo primeiro e segundo termos a direita. O terceiro termo refere-se à incerteza relativa na medição do fator médio de intermitência associada ao fator de corte.

Em concordância com as Seções A.3.2 e A.3.3, a incerteza relativa do comprimento adimensional médio da bolha alongada é 4,8%, enquanto a incerteza relativa do comprimento adimensional médio do pistão de líquido é 5,4%. Emprega-se o fator médio máximo de intermitência encontrado no teste #1.

Similarmente à incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada associada ao fator de corte, avalia-se a influência do fator de corte na frequência média de passagem de golfadas e admite-se a incerteza relativa média obtida. Logo, a incerteza relativa na determinação da frequência média de passagem de golfadas atribuída ao fator de corte é igual a 2,7%. Dessa forma, a incerteza relativa na determinação do fator médio de intermitência é 6,8%.

A.3.5 Incerteza da Frequência Média de Passagem de Golfadas

A frequência de passagem de golfadas é determinada pelo inverso do período da unidade, sendo o período da unidade dado pela soma do tempo de residência da bolha alongada e do pistão de líquido, conforme exposto na Equação 4.7.

A incerteza relativa na estimativa da frequência média de passagem de golfadas é definida pela Equação A.10:

$$\varepsilon \bar{f} = \sqrt{(\varepsilon t_u)^2 + (\varepsilon FC_{\bar{f}})^2}, \quad (\text{A.10})$$

onde o primeiro termo do lado direito representa a incerteza relativa na medição do período da unidade e o segundo termo a direita refere-se à incerteza relativa na medição da frequência média de passagem de golfadas associada ao fator de corte.

A incerteza relativa na medição do período da unidade é considerada desprezível, visto que a frequência de amostragem é de 3000 Hz e a frequência máxima de ocorrência de golfadas é de 3,26 Hz. Analogamente à incerteza relativa da velocidade média de translação do nariz da bolha alongada atribuída ao fator de corte, investiga-se a influência do fator de corte na estimativa da frequência média de passagem de golfadas e assume-se a incerteza relativa média estimada. Desse modo, a incerteza relativa da frequência média de passagem de golfadas associada à escolha do fator de corte é igual a 0,9%. Portanto, a incerteza relativa na medição da frequência média de passagem de golfadas é 0,9%.

A.3.6 Incerteza da Taxa Média de Coalescência

A taxa média de coalescência das estruturas constituintes do escoamento intermitente avaliada entre duas estações de medição consecutivas é expressa pela Equação 4.9.

A incerteza relativa na determinação da taxa média de coalescência é o dobro da incerteza relativa da frequência média de passagem de golfadas, consoante à Equação A.11:

$$\varepsilon \bar{C} = 2\varepsilon \bar{f}. \quad (\text{A.11})$$

Como retratado na Seção A.3.5, a incerteza relativa da frequência média de passagem de golfadas é igual a 0,9%. Logo, a incerteza relativa na estimativa da taxa média de coalescência é 1,9%.